



Norges Miljø- og Biovitenskapelige  
Universitet  
Samfunnsvitenskapelig fakultet  
Handelshøyskolen

Masteroppgave 2015  
30 stp

## **Grønne sertifikater - en direkte subsidie til eksport**

Pris- og volumeffekter ved innføring av  
grønne sertifikater i en åpen økonomi.

## **Green Certificates - a direct Subsidy for Export**

Price and Volume Effects of Introducing  
Green Certificates in an Open Economy

Kevin R. Kaushal

## **Forord**

Oppgaven er gjennomført som en del av masterstudiet i økonomi- og administrasjon med spesialisering i samfunnsøkonomi. Jeg vil takke alle engasjerte forelesere ved NMBU for to veldig interessante år. Takk til mine veiledere Torstein Bye og Olvar Bergland for verdifull tilbakemelding og diskusjon underveis. Deres engasjement og formidling av energiøkonomi er svært smittsom.

Takk til Statkraft, og spesielt Lars Ragnar Skutlaberg og Roy Arne Syversrud, for å ha lettere gjort leting av kilder og informasjon. Medstudent Eivind Skjærven fortjener også en stor takk for å være tilgjengelig for diskusjon og innspill gjennom mine 2 år på NMBU.

Tilslutt vil jeg få takke min familie for å gi meg rom og støtte til å fullføre arbeidet, og mine kontorkolleger som har gjort universitetslivet til mer enn bare et studiested.

Eventuelle feil og mangler i oppgaven er mitt ansvar.

Oslo, 12. mai 2015

Kevin R. Kaushal

## Sammendrag

Hensikten med denne oppgaven er å se nærmere på pris- og volumeffektene ved innføring av grønne sertifikater i en åpen økonomi, ved handel med to store land. Et sentralt arbeid som oppgaven er basert på er Torstein Bye sine analyser av grønne sertifikater (Bye 2003). Grønne sertifikater er en støtteordning for utbygging av grønn energi, hvor forbrukere av strøm subsidierer den grønne produsenten. I oppgaven er en likevektsmodell utviklet for å analysere pris- og volumeffektene i kraftmarkedet og det grønne sertifikatmarkedet, og datamaterialet er verdier målt i Norge, Storbritannia og Tyskland.

Selv om effektene er følsomme for tilbud- og etterspørselsetelastisitetene, finner vi at krav om økt andel grønn energi gjennom grønne sertifikater øker krafttilbudet i markedet. Dette fører til at kraftprisen faller og videre redusert tilbud av vanlig energi i innlandsmarkedet, både under autarki og begrenset overføringskapasitet. Hvor vidt den totale omsatte mengden av energi øker eller faller avhenger av andelen grønt som bestemmes.

Ved ubegrenset overføring vil effekten avhenge av hvor stort utlandet er. Ved et mindre utland vil økt tilbud fra innlandet påvirke kraftprisen sterkere, og kraftprisen samt det totale tilbudet av vanlig energi faller. Dersom utlandet er svært stort i forhold, er det usikkert hva som vil skje med prisseffekten ved økt tilbud fra innlandet. I henhold til teori vil effekten av økt tilbud fra innlandet være minimal på kraftprisen. Men det som er felles for både et stort og et lite utland ved ubegrenset overføringskapasitet, er at kraftproduksjon i innlandet i større grad blir eksport ved økt krav av grønn energi.

Etter et bestemt andelskrav vil konsumentprisen stige for de sertifikatpliktige, og innlandsforbruket faller som følge av økt konsumpris. Ved mulighet for handel vil mer av kraften eksporteres til utlandet, som betaler relativt mindre for energien i forhold til innlandsforbrukerne. Høyere kapasitet på overføringsmulighetene gir mer eksportert kraft fra det sertifikatpliktige landet. Resultatene tilsier derfor at de subsidiene vi innfører for å øke tilbudet av grønne teknologier i hjemlandet dermed er en direkte støtte til eksport.

## **Abstract**

This master thesis analyses the price and volume effects of introducing green certificates in an open economy, with possibility for electricity trade with two large countries. The thesis is based on earlier works by Torstein Bye (2003). Green certificate is a supporting instrument for renewable energy where consumers of electricity subsidize the green producers. A theoretical model is developed to analyze the price and volume effects in the electricity and green certificate market. Data used in the analysis are collected from Norway, UK and Germany.

Although the effects are sensitive to elasticities of supply and demand we find that the energy supply in the market increases as the required green share increases. This causes the energy price to fall, and further reduces supply of traditional energy in the domestic market, both under autarky and limited transmission capacity. The total energy volume in the market depends on the size of the required green share.

With unlimited transfer capacity, the effect depends on how big the abroad market is. With a smaller abroad market, the increased supply from the green certificate affects the world energy price much stronger, causing the energy price and the total supply of traditional energy to fall. If the abroad market is very large, the result is ambiguous. According to theory, the increased supply from the green certificate has limited effects on a large abroad. But under both scenarios with unlimited transmission capacity, more of the power generated will be exported abroad as the required share of green energy increases.

After a certain amount of green share, the purchaser price increases, and domestic consumption falls due to the increased consumer price. With higher potential for transmission abroad, more of the power is now exported from the domestic market. The results therefore indicates that subsidies we introduce to increase the share of green technologies domestically, are direct funding for export.

## **Innholdsfortegnelse**

1. Innledning .....	1
1.1. Problemstilling og hypotese .....	2
1.2. Oppgavens oppbygging .....	3
2. Bakgrunn .....	5
2.1 Kravet om fornybarenergi .....	5
2.1.1 Klimahandlingspakken 2009 .....	5
2.1.2 Ny klimapakken mot 2030 .....	7
2.2 Instrumentene i det europeiske energimarkedet .....	8
2.2.1 Grønne sertifikater .....	8
2.3 Internasjonal handel .....	11
3. Elektrisitetsmarkedet og det grønne sertifikatmarkedet .....	15
3.1 Elektrisitetsmarkedet under autarki .....	15
3.2 Elektrisitetsmarkedet ved internasjonal handel .....	16
3.2.1 Import .....	16
3.2.2 Eksport .....	17
3.2.3 Begrenset overføringskapasitet .....	18
3.3 Grønne sertifikatmarkedet .....	20
4. Teoretisk analyse .....	23
4.1 Antagelser .....	23
4.2 Modellen .....	23
4.2.1 Etterspørselssiden .....	23
4.2.2 Tilbudssiden .....	24
4.2.3 Likevektsløsning .....	25
5. Datamaterialet .....	29
5.1 Elektrisitetsmarkedet i Norge .....	29
5.2 Elektrisitetsmarkedet i Tyskland og Storbritannia .....	30
5.3 Grønne sertifikatsektoren .....	31
5.4 Mulige svakheter med materialet .....	32
6. Simuleringen .....	33
6.1 Norge under Autarki .....	34
6.2 Åpent marked med ubegrenset overføringskapasitet .....	36
6.3 Åpent marked med begrenset overføringskapasitet .....	39
6.4 En sammenligning av de ulike scenariene .....	41

7. Sensitivitetsanalyse og videre diskusjon.....	45
7.1 Sensitivitetsanalyse .....	45
7.1.1 Sensitivitetsanalyse av pris- og volumeffekter ved ubegrenset flyt.....	45
7.1.2 Sensitivitetsanalyse av pris- og volumeffekter ved begrenset kapasitet.....	47
7.2 Diskusjon rundt hypotesen og resultatene .....	49
7.3 Forutsetninger og videre diskusjon.....	50
8. Konklusjon .....	53
9. Referanseliste.....	55
10. Vedlegg.....	59
10.1 Optimal tilpasning av vannkraftprodusent.....	59
10.2 Utledning av den teoretiske modellen.....	62
10.3 Den kalibrerte modellen.....	66
10.4 GAMS modellen.....	68
10.5 Inkluderende figurer .....	75
10.5.1 Figurer til simuleringen .....	75
10.5.2 Figurer til sensitivitetsanalysen.....	77

## Figurliste

Figur 1: Markedets tilpasning ved subsidiering av teknologi $T_g$ .....	9
Figur 2: Økt konsumentpris og redusert omsattmengde når forbruker betaler avgift .....	10
Figur 3: Kraftutveksling i Norden, hentet fra NVEs kvartalsrapport, 4. kvartal 2013 .....	12
Figur 4: Sjøkablene mot Tyskland og Storbritannia, på rundt 1400MW hver .....	13
Figur 5: Den grønne teknologien er ikke konkurranse dyktig i dette markedet .....	15
Figur 6: Import gir økt samfunnsøkonomisk overskudd .....	17
Figur 7: Mulighet for eksport øker det samfunnsøkonomiske overskuddet .....	18
Figur 8: Vannkraftprodusentens tilpasning ved begrenset import og eksport .....	19
Figur 9: Markedets tilpasning med grønne sertifikater, total omsattmengde øker .....	20
Figur 10: Markedets tilpasning med grønne sertifikater, total omsattmengde faller .....	21
Figur 11: Mulighet for kraftoverføring skjer kun gjennom Norge i modellen .....	34
Figur 12: Prisendring i Norge under autarki .....	35
Figur 13: Volumendringene i Norge under autarki .....	35
Figur 14: Prisendring i Norge ved ubegrenset kraftoverføring .....	37
Figur 15: Volumendring i Norge ved ubegrenset kraftoverføring .....	38
Figur 16: Endringen i nettoeksport ved ubegrenset kraftoverføring .....	38
Figur 17: Prisendring i Norge ved begrenset kraftoverføring .....	39
Figur 18: Prisendring i Norge, Storbritannia og Tyskland ved begrenset kraftoverføring .....	40
Figur 19: Endringen i nettoeksport ved begrenset kraftoverføring .....	40
Figur 20: Volumendring i Norge ved begrenset kraftoverføring .....	41
Figur 21: Sammenligning av prisendringene under de ulike scenarioene i Norge .....	42
Figur 22: Sammenligning av etterspørselen i Norge under de ulike scenarioene .....	42
Figur 23: Sertifikat- og konsumentprisendring under de ulike scenarioene .....	43
Figur 24: Kraftprisen med ulike elastisitetskombinasjoner, ved ubegrenset kraftoverføring .....	46
Figur 25: Tilbudet av vanlig energi avtar i Norge med de ulike kombinasjonene, ved ubegrenset kraftoverføring .....	46
Figur 26: Konsumentprisen med ulike elastisitetskombinasjoner ved ubegrenset kraftoverføring .....	47
Figur 27: Kraftprisen med de ulike elastisitetskombinasjonene i Norge, ved begrenset kraftoverføring .....	48
Figur 28: Konsumentprisen i Norge med ulike elastisitetskombinasjonene, ved begrenset kraftoverføring .....	48
Figur 29: Fallende tilbud av vanlig energi med de ulike elastisitetskombinasjonene, ved begrenset kraftoverføring .....	49
Figur 30: Vannkraftprodusentens tilpasning ved ingen skranker og ubegrenset kraftoverføring .....	61
Figur 31: Tilbudet av energi og nettoeksport i Norge under de tre ulike scenarioene .....	75
Figur 32: Engrospris i Tyskland og Storbritannia under de tre ulike scenarioene .....	75
Figur 33: Tilbud av energi i Tyskland og Storbritannia under de tre ulike scenarioene .....	76
Figur 34: Nettoeksport fra Tyskland og Storbritannia under de tre ulike scenarioene .....	76
Figur 35: Det totale forbruket i modellen under de tre ulike scenarioene .....	77
Figur 36: Nettoeksport fra Norge med ulike elastisitetskombinasjoner, ved ubegrenset kraftoverføring .....	77
Figur 37: Etterspurt kraft i Norge med ulike elastisitetskombinasjoner, ved ubegrenset kraftoverføring .....	78
Figur 38: Nettoeksport fra Norge med ulike elastisitetskombinasjoner, ved begrenset kraftoverføring .....	78
Figur 39: Etterspurt kraft i Norge med ulike elastisitetskombinasjoner, ved begrenset kraftoverføring .....	79

## 1. Innledning

Global oppvarming og klimatrusselen fra utslipp av klimagasser er stadig et sentralt tema innenfor energi-, naturressurs- og klimaøkonomi. Det finnes i dag ulike virkemidler for å imøtekomme disse truslene både nasjonalt og internasjonalt, og det kommer stadig offentlige debatter knyttet til hvilket av virkemidlene som skal tas i bruk. De mest brukte ordningene er;

- i) å beskatte/avgiftslegge produksjon av ikke-fornybare energi (sorte sertifikater)
- ii) spesifisere et energieffektiviseringskrav på forbrukersiden (hvite sertifikater)
- iii) subsidiere den «grønne» teknologien (grønne sertifikater).

Mange samfunnsøkonomer er kritiske til at flere virkemidler innføres simultant i et marked. Argumentet er at den totale effekten og kostnad vil være uvisst, og målet man setter vil være vanskeligere å vurdere. Et av virkemidlene som er mye tatt i bruk er å subsidiere grønteknologi. Disse teknologiene er CO<sub>2</sub>-nøytralt og utømmelig innen et menneskelig tidsperspektiv. Et problem i dag er at disse teknologiene er for dyre til at de blir tatt i bruk i et fritt marked. (Bye 2003; Bøeng 2010)

I Norge og Sverige ble det i 2012 innført en støtteordning for utbygging av grønn energi, hvor forbrukere av strøm subsidierer den grønne produsenten. Den så kalte grønne sertifikatordningen ble allerede før innføringen advart av flere økonomer for å være “dyr og formålsløs moro” (Bye & Hoel 2009). Deler av kritikken omhandler pris- og volumeffektene som vil oppstå ved å øke tilbudet av grønt, samt nytteverdien av denne ordningen i Norge. Norge har allerede en stor andel av vannkraft, hvorfor skal det bygges ut mer grønt gjennom subsidier?

Det bygges i dag ut sjøkabler mot Tyskland og Storbritannia med en kapasitet hver på 1400 Megawatt (MW). Dette tilsvarer en årlig kapasitet på rundt 12 terrawattimer (TWh). Totalt øker det handelsmulighetene årlig med 24 TWh som tilsvarer rundt 20 % av dagens produksjonsnivå i Norge. Effektene av sertifikatordningen er usikre når kablene er i drift. I Bye (2003) og Bye & Hoel (2009) analyseres effektene av ordningen under et autarki. Det er nettopp effekten av grønne sertifikater denne oppgaven vil undersøke, med fokus på handel med to store land som Tyskland og Storbritannia. Oppgaven vil vektlegge analysen med ubegrenset og begrenset overføringskapasitet. Dette leder til problemstillingen og hypotesen i oppgaven.



## 1.1. Problemstilling og hypotese

*Hvordan endres tilpasningen i et kraftmarked med grønne sertifikater, når markedet åpnes for handel med to store land? Hvordan endres tilpasningen fra ubegrenset til begrenset overføring for landet med sertifikatordningen? Hvilke pris- og volumeffekter vil oppstå i innlandsmarkedet og sertifikatmarkedet?*

Med følgende hypotese;

*Under autarki vil sertifikatplikten for forbrukerne isolert sett bidra til redusert etterspørsel etter elektrisitet. Subsidieffekten gjør grønn energi mer lønnsomt og fører til økt tilbud av grønn produksjon. Det økte tilbudet av grønt fører til redusert kraftpris, og dermed redusert lønnsomhet og kvantum av vanlig energi produksjon. Prisen for konsumentene er usikker, og vil avhenge av avgifts- og subsidieffekten. Både pris og volum vil avta i et autarki.*

*Når markedet åpner for ubegrenset overføring av kraft, vil kraftprisen være den samme i alle tre land. Markedet med sertifikatordningen vil øke tilbudet av kraft i takt med økt andel grønt. Det økte tilbudet fører til reduserte kraftpriser og mer av kraften vil flyte over fra landet med sertifikatordningen til de andre landene. Tilbudet av vanlig energi vil avta med fallende kraftpris på lik linje med autarki.*

*Ved begrenset overføringskapasitet vil prisene være like i alle tre land frem til kapasiteten er fullt utnyttet. Deretter vil landet med sertifikatordningen tilpasse seg slik det gjorde under et autarki, og pris og volum vil avta i landet med sertifikatordningen. Prisendringen og forbruket for innlandskonsumertene er usikker ved ubegrenset og begrenset kraftflyt, og vil avhenge av avgifts- og subsidieffekten.*

I oppgaven vil analyser bli gjennomført under antagelse om autarki, ubegrenset og begrenset overføringskapasitet mellom landegrensene, og vektlegge de to siste analysene. Med ubegrenset overføringskapasitet menes kapasitet på linjen som er stor nok til at kraft kan handles mellom landene uansett mengde. Flaskehalsene oppstår når overføringslinjene utnyttes til kapasitetsgrensen og kabelkapasiteten er maksimert, til tross for at det er ledig produksjonskapasitet i markedene som kan importeres/eksporteres mellom områdene. Dette vil skje i situasjonen med begrenset overføring.

Hypotesene er inspirert av artikkelen “On the Price and Volume Effects from Green Certificates in the Energy Market”, hvor Torstein Bye diskuterer effekten av det grønne sertifikatmarkedet under et autarki. Ordningen er allerede innført i Norge, som i 2020 bygger utenlandskabler til Tyskland og Storbritannia. Disse sjøkablene vil øke overføringskapasiteten betydelig mot Europa og Norges sertifikatordning vil dermed påvirkes av et større internasjonalmarked.

I oppgaven benyttes årlige data fra Norge, Tyskland og Storbritannia for å analysere volum- og priseffekter. Tidsoppløsningen på ett år medfører at kortsiktige effekter som oppstår i markedet ignoreres i modellen. Norge og Tyskland kan for eksempel ha en svært høy utnyttelse av kablene i hver time, men ha liten nettoflyt i løpet av et år.

## **1.2. Oppgavens oppbygging**

I kapittel 2 vil oppgaven gå gjennom bakgrunn og debatten knyttet til grønne sertifikater og handel. I kapittel 3 presenteres markedene som vil bli analysert med og uten handels muligheter. I kapittel 4 vil en teoretisk analyse legges frem, som danner grunnlaget for simuleringsmodellen i kapittel 6. Mens dataene som brukes i simuleringen legges frem og diskuteres i kapittel 5. Det syvende kapitlet tester og diskuterer resultatene for sensitivitet, samt ser nærmere på forutsetningene for modellen. Til slutt konkluderes oppgaven i kapittel 8.



## **2. Bakgrunn**

Kapitlet vil presentere bakgrunnen og argumentene rundt innføring av det fornybare kravet. Konseptet og begrepet grønne sertifikater vil bli presentert samt planene for sjøkabler mot vil binde Norge med Storbritannia og Tyskland.

### **2.1 Kravet om fornybarenergi**

Energibehovet i verden er stadig økende, og den økte etterspørselen skaper høyere utslipp av klimagasser som har en negativ påvirkning på miljøet(IEA 2014b). Det finnes flere måter å redusere disse gassene på og samtidig imøtekomme den globale etterspørselen. En av metodene som er brukt i bl.a. EU er et krav om en andel fornybar teknologi av totale energiproduksjon(Bøeng 2010).

Ikke-fornybar energi er energikilder som kjennetegnes ved begrensede naturressurser som vil tømmes innen et menneskelig tidsperspektiv. De viktigste energikildene som er av denne typen er olje, naturgass og kull, hvor kull og gass står for den største andel av elektrisk produksjon i verden(IEA 2014a). Et av biproduktene ved bruk av ikke-fornybare energi er blant annet klimagassen CO<sub>2</sub>. Atomenergi er også en ikke-fornybar energikilde, men er CO<sub>2</sub>-nøytral(Bøeng 2010, s.48).

Fornybar energi omfatter energi kilder som kan anses som utømmelig innen et menneskelig tidsperspektiv, og som har en kontinuerlig tilførsel av ny energi gjennom naturens eget kretsløp. Eksempler på dette er bl.a. vannkraft, vindkraft, solenergi og bioenergi.

#### **2.1.1 Klimahandlingspakken 2009**

Den Europeiske Union (EU) fornybardirektiv stiller krav til andel fornybar energi på nasjonalt nivå. Formålet med direktivet er å øke forsyningssikkerheten innen EU, stimulere forskning og utvikling av fornybar teknologi samt redusere utslippet av klimagasser(EU 2009). Videre hevdes det at en støtteordning for fornybar teknologi vil bidra til økt sysselsetting og styrke konkurranse mot den tradisjonelle teknologien, som primært er av typen ikke-fornybar. Det langsiktige målet er å skape et vedvarende og bærekraftig energiforsyning (forsyningssikkerhet) og dermed redusert avhengighet av importert olje og gass. EUs ønske om mer fornybar energi har også sammenheng med bekymringen om stigende energipriser grunnet avtagende fossile-energiressurser i verden(Bhattacharyya 2011; Bøeng 2010).

Direktivet er en av flere målsetninger som EU har satt<sup>1</sup>, som sammen utgjør energi- og klimahandlingspakken fra 2009. Et av målene er å sikre en andel fornybar energi på 20 prosent av totalt energibruk i år 2020<sup>2</sup>. For å kunne oppnå dette overordnede målet ble det definert fire mekanismer i direktivet(Lundberg & Eliston 2014):

- 1) Fornybarenergi utover det som trengs til å oppnå eget mål, kan selges fra ett medlemsland til et annet
- 2) Felles energiprojekter innenfor elektrisitet, varme og kjøling kan utvikles
- 3) For elektrisitet kan det også samarbeides om prosjekter i tredjeland
- 4) To eller flere medlemsland kan koordinere støttesystemer eller etablere felles støttesystem

Det er innført ulike virkemidler for å kunne oppnå målene for energi- og klimahandlingspakken 2009. CO<sub>2</sub>-kvotesystemet, subsidieordninger av grønn energi og energieffektivisering er velkjente instrumenter i det europeiske markedet(Bye & Bruvoll 2008).

Det er blant flere en vanlig misforståelse å anta at investeringer i energieffektivisering eller fornybar vil bidra til lavere klimagassutslipp når en allerede har et kvotesystem i EU(Bye & Amundsen 2012; Böhringer & Rosendahl 2009). Kvotemarkedet består av en bestemt mengde med tilgjengelige kvoter til produsentene, og pålegges kravene om andel energieffektivisering eller fornybarenergi tilsier markedseffektene at kvoteprisen vil falle mens utslippsmengden vil være den samme fordi et CO<sub>2</sub>-tak er fastsatt(Böhringer & Rosendahl 2009). En innstramming av antall tilgjengelige kvoter i markedet vil derfor være en mer effektiv måte å oppnå lavere utslippsnivå(Bye 2009).

Med ønsket om økt forsyningssikkerhet og mindre avhengighet av importert olje og gass til EU, finnes det flere virkemidler som kan tas i bruk. Dersom målet er å overkomme problemer med energiknapphet kan tilbudssiden utbygges gjennom subsidier, eller innføring av en el-avgift på forbrukersiden som vil resultere i lavere etterspørsel. Utbyggingen av tilbudssiden vil ikke nødvendigvis føre til mindre knapphet av produksjon dersom teknologien ikke er den rette. Den store utbyggingen av vind- og solenergi kan f.eks. føre til større svingninger i produksjonen. Produksjonene er av typen uregulerbar kraft og vil ikke nødvendigvis bidra til økt sikkerhet i forsyningen(Bendiksen 2014).

---

<sup>1</sup> 1) Minst 20 % reduksjon av drivhusgasser fra 1990-nivå, 2) 20 % reduksjon av energiforbruk sammenlignet med en referansebane 3) fornybarandel i EU på 20 %

<sup>2</sup> Målene er i praksis erstattet med ny klimahandlingspakke mot 2030.

Subsidie av fornybarenergi kan bidra til R&D (Research and Development), styrket konkurransedyktighet og økt sysselsetting(Bye 2009; Bøeng 2010). En ekstrainntekt utover energiprisen vil gjøre det lønnsomt for produsenten av grønn energi samt bidra til større etterspørsel etter fornybarteknologi. Baktanken er at teknologien vil bli rimeligere etter hvert som flere etterspør og tar den i bruk, men det kan argumenteres med at det finnes en mer effektiv måte å fremme disse målene. En strengere klimapolitikk gjennom bl.a. karbonmarkedet (Emission Trading Scheme) skal redusere lønnsomheten av produksjon knyttet til fossilenergiressurser. Lavere lønnsomhet og høyere energipriser vil gjøre fornybarenergi mer lønnsomt, og som videre fører til økt R&D, konkurransefortrinn og sysselsetting(Bye & Hoel 2009).

Det kan altså være vanskelig å koble sammen årsak og virkning(Bye & Hoel 2009, s.37). I EUs energi- og klimahandlingspakke er det innført flere instrumenter samtidig for å oppnå en rekke målsetninger. En bivirkning av dette er at måloppnåelsene vil være vanskelig å vurdere, og det oppstår potensielt en lavere samfunnsøkonomisk lønnsomhet(Bye & Amundsen 2012, s.52).

### **2.1.2 Ny klimapakken mot 2030**

23. oktober 2014 vedtok det europeiske råd en ny klimapakke frem mot 2030. Rammeverket inkluderer det overordnede mål for redusert klimautslipp på 40 % sammenlignet med 1990 nivået. Selv om kvotesystemet Emission Trading Scheme (ETS) er hovedvirkemidlet på EU-nivå, vil det være en tredelt målstruktur. Minst 27 % økt effektivisering sammenlignet med en referansebane, og en fornybar andel på minst 27 % (det så kalte 27-27-40 målet). Det har også kommet et tilleggsmoment av typen “fleksibel klausul”, som innebærer at det europeiske rådet etter klimatoppmøtet i Paris, desember 2015, kan komme tilbake til elementer av beslutningen(Erichsen et al. 2014).

For Norges del vil denne klimapakken ha en stor betydning fordi nasjonen er en del av EUs ETS og energimarked. Primært er det kun utslippsmålet som står særstilt for alle enkelt landene, og er det eneste bindende målet. Kravet om effektivisering og fornybar energi er på EU-nivå og brytes ikke ned på landsnivå. Dermed må hvert av landene selv velge virkemidler for å nå det overordnede målet om 40 % utslippskutt. Dette gjør bl.a. at Norge står fritt til å velge de virkemidlene de ønsker frem mot 2030. Norge har tross alt en svært høy fornybarandel sammenlignet med andre land i Europa (Gommesen et al. 2013).

## **2.2 Instrumentene i det europeiske energimarkedet**

En eksternalitet kan defineres som en utilsiktet samfunnsøkonomisk kostnad eller gevinst som enkeltaktører ikke blir belastet eller godskrevet for, som de derfor ikke tar hensyn til ved sin tilpasning. Eksternaliteter medfører derfor et avvik mellom privat- og samfunnsøkonomisk lønnsomhet av godet.

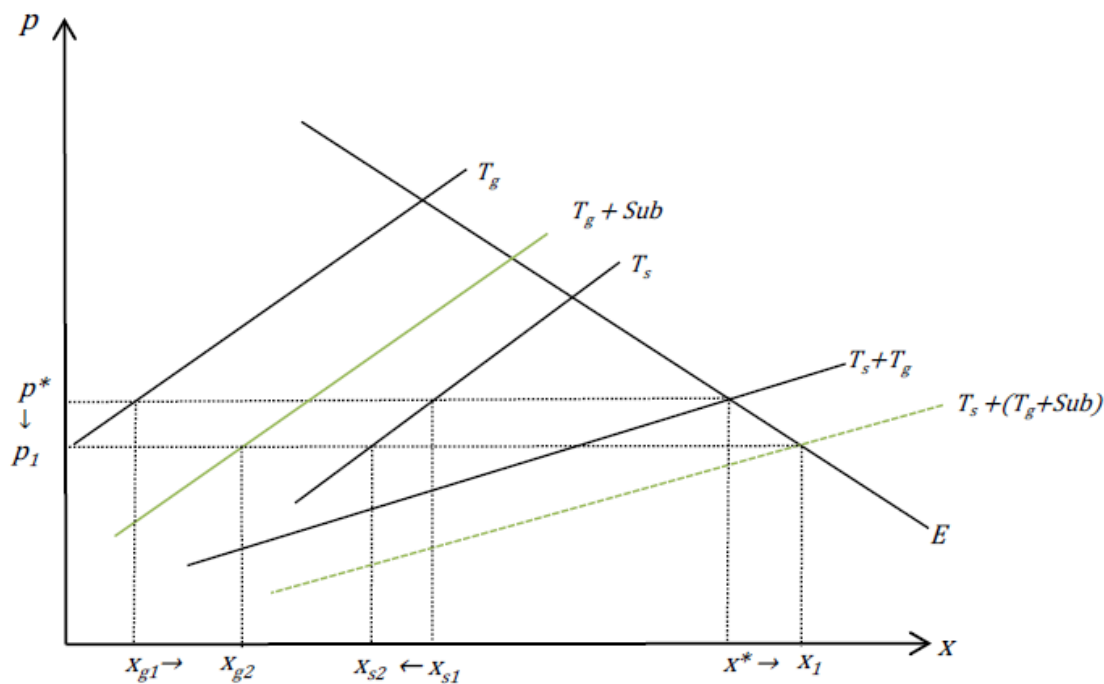
Sett fra et samfunnsøkonomisk optimalt nivå, vil man ved positive eksternaliteter i produksjon produsere for lite og for mye ved negative eksternaliteter. Derfor argumenteres det for bruk av ulike instrumenter for å internalisere eksternaliteter. Et optimalt instrument vil føre til fullstendig internalisering, og maksimere det samfunnsøkonomiske overskuddet. Utslipp av klimagasser er et eksempel på en negativ eksternalitet. EU ETS (European Union Emission Trading Scheme) er et instrument med mål å internalisere disse eksternalitetene, mens subsidie av fornybar teknologi har vært argumentet for å internalisere positive effekter knyttet til bl.a. forskning og utvikling (Bye & Bruvoll 2008). Disse instrumentene kan også refereres til som henholdsvis sorte- og grønne sertifikater (Bye & Amundsen 2012). I tillegg finnes det hvite sertifikater som er en ordning hvor man pålegger sparing av en viss mengde energi på forbrukssiden, med mål om å øke energieffektivisering. Oppgaven ser nærmere på den grønne sertifikatordningen.

### **2.2.1 Grønne sertifikater**

Siden 2012 har Norge og Sverige hatt et felles marked for grønne sertifikater. Målet med denne ordningen er å bidra til EUs fornybardirektiv ved å øke andelen fornybar produksjon med henholdsvis 13,2 terrawattimer pr. år (TWh) i hvert av landene til utgangen av 2020 (Lundberg & Eliston 2014). Det er knyttet store kostnader til disse fornybare teknologiene sammenlignet med de tradisjonelle, derfor er de lite konkurransedyktige. Sertifikatordningens mål er nettopp å støtte utbygging av fornybare energi. 13.3.2015 ble Norges Olje- og energiminister Tord Lien og Sveriges energiminister Ibrahim Baylan enige om endringer i avtalen. Fellesmålet for 2020 økes med 2 TWh til 28,4 TWh, og måløkningen innebærer ingen endring i den norske finansieringsforpliktelsen på 13,2 TWh (OED 2015).

Sertifikatordningen fungerer slik at de som ønsker å produsere kraft fra fornybare kilder, kan søke om et sertifikat av myndighetene. I Norge er det Norges Vassdrag og Energidirektorat (NVE) som utsteder disse sertifikatene, og kraftverket kan først godkjennes for tildeling når søknaden er fullført og kraftverket er i drift. Myndighetene vil utstede sertifikatene til

produsentene for hver megawatttime (MWh) de produserer. Siden det er krav om kjøpeplikt, vil sertifikatene selges og produsentene vil få en ekstra inntekt ut over systemprisen i markedet. Produsentene som frem til 2012 har produsert elektrisitet gjennom fornybar teknologi, kan også søke om sertifikater ved utvidet kapasitet utover nåværende produksjon. For produsentene av kraft gjennom fornybare kilder utgjør denne ordningen en subsidie.



Figur 1: Markedets tilpasning ved subsidiering av teknologi  $T_g$

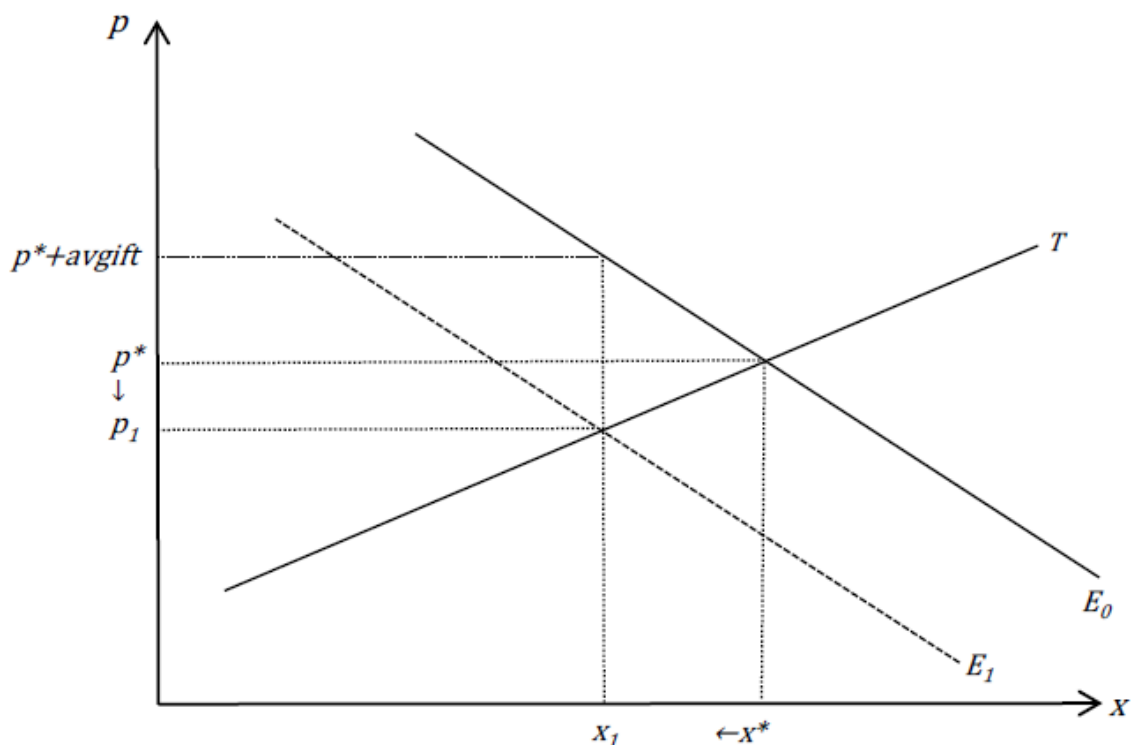
Figur 1 illustrerer hvordan subsidiering av en teknologi kan påvirke likevekten i markedet. Etterspørselen etter kraft er gitt ved den fallendekurven  $E$ . Konsumentene etterspør gode grønn energi  $g$  og sort energi  $s$ , som er perfekte substitutter i deres øyne. Det gjøres antagelse om fri konkurranse og to tilbydere. Ved å subsidiere en ønsket teknologi  $g$ , vil produsenten av denne teknologien få en merinntekt utover markedsprisen. Dette fører til at produsenten av gode  $g$  øker sitt tilbud i markedet og den nye tilbudskurven er vist ved  $T_g + sub$ . Den omsatte mengden av  $g$  øker fra  $x_{g1}$  til  $x_{g2}$ . Det opprinnelige totaltilbudet i markedet var  $T_s + T_g$ , men grunnet økt tilbud av  $g$  blir det nye tilbudet vist ved tilbudskurven  $[T_s + (T_g + Sub)]$ . Økt tilbud av  $g$  vil redusere prisen i markedet slik at  $p^*$  faller til  $p_1$ , og prisreduksjonen fører til at produsent av teknologi  $s$  vil redusere sitt tilbud. Den omsatte mengden av  $s$  faller fra  $x_{s1}$  til  $x_{s2}$ . I illustrasjon øker totaltilbudet i markedet fra  $x^*$  til  $x_1$ . I figur 1 gir subsidiering produsenten av den subsidierte teknologien en merinntekt utover prisen i markedet, mens den ikke-subsidierte blir straffet ved at prisen i markedet faller.



Produktet  $g$  blir mer konkurransedyktig, prisen i markedet faller og omsattmengde øker. Som en ser vil endringene i størrelsene avhenge av elastisitetene for tilbud og etterspørsel.

Det er kraftleverandørene som primært er sertifikatpliktige, men også storkunder gjennom kraftbørsen eller bilaterale avtaler er pålagt til å delta. De sertifikatpliktige må hvert år kjøpe sertifikater tilsvarende en prosentvis andel av total etterspurt- eller levert elektrisitet. Dette vil føre til et ekstra tillegg utover kraftprisen i markedet, altså vil sertifikatet utgjøre en avgift for brukere av elektrisitet. Avgiften blir innbakt i forbrukerens strømmregning.

Figur 2 illustrerer forbrukernes tilpasning gitt en pålagt avgift som de må betale ved konsum. Etterspørselen  $E_0$  er vist ved den fallende kurven. Kurven  $T$  er tilbudet av et gode i markedet, og det gjøres antagelser om fri konkurranse prinsippet. Hvis myndighetene avgiftslegger konsumentene for kjøp av dette godet, vil dette medføre økt konsumpris ut over prisen i markedet. Etterspørselen skifter innover fra  $E_0$  til  $E_1$ , og redusert etterspørsel gjør at prisen som produsentene mottar faller fra  $p^*$  til  $p_1$ . Konsumentene vil nå betale en pris  $p^* + avgift$ , og vil etterspørre mindre av godet mens tilbyderne forholder seg til den nye prisen  $p_1$ . En avgift på forbrukeren gir en økt kostnad utover prisen, konsumentenes etterspørsel vil skifte innover, og markedspris og omsattmengde faller. I likhet med subsidiering av teknologi, vil endring i størrelsene avhenge av elastisiteten på tilbud og etterspørsel.



Figur 2: Økt konsumentpris og redusert omsattmengde når forbruker betaler avgift

Krav om andel grønne sertifikater vil øke gradvis frem til 2020, noe som fører til økt etterspørsel etter fornybar energi gjennom grønne sertifikater. Det er usikkert hvorvidt denne ordningen vil utvides videre under EUs nye klimapakke for 2030(Jansrud 2014), men produsentene vil få sertifikatstøtte 15 år videre etter 2020. Sertifikatene annulleres 1. april hvert år og kan ikke gjenbrukes. Dette gjør at sertifikatpliktige må kjøpe nye sertifikater for å oppfylle neste års plikt og skaper en konstant etterspørsel etter sertifikatene. Kurven for det økte kravet vil justeres etter det forventede elektrisitetsforbruket, men målet om 28,4TWh økt fornybar kraft produksjon i Norge og Sverige vil ikke endres(Lundberg & Eliston 2014).

Store deler av debatten rundt sertifikatordningen omhandler avviket mellom mål og virkemidler. Virkningen av å beskutte forbruket av elektrisitet og subsidiere fornybar teknologi vil føre til økt tilbud, men redusert etterspørsel. Hvor stor virkningen vil være på hver av dem er usikkert(Bye 2003; Bye 2009). Bye og Hoel(2009) påpeker at man må bl.a. skille mellom miljøeksternaliteter og FOU-eksternaliteter, og er videre kritisk til den manglende nytteverdien av sertifikatene i Norge. Den forventede reduksjonen i klimagassutslipp fra mer grønn energi vil heller ikke finne sted så lenge utslippstaket i kvotemarkedet er bindende, noe som støttes av flere økonomer(Böhringer & Rosendahl 2009).

Oppgaven vil referere til grønn energi som den fornybare teknologien. Den sertifikatstøttede teknologien vil dermed bli kalt grønn energi<sup>3</sup>. Vannkraft, som er den tradisjonelle teknologien i Norge, kaller vi tradisjonell eller vanlig energi i likhet med ikke-fornybar.

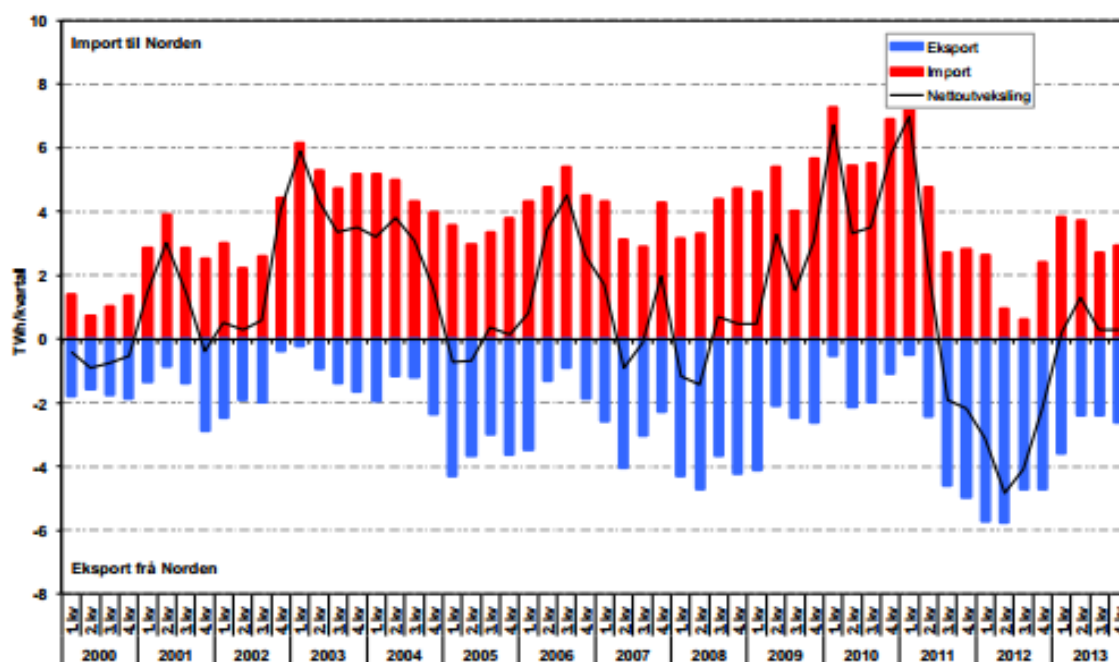
## 2.3 Internasjonal handel

Norge er en del av et kraftmarked sammen med bl.a. Sverige, Finland, Danmark, Estland, Litauen og Latvia. At kraften flyter over landegrensene er naturlig konsekvens av at den følger minste motstandsvei i nettet. I likhet med Norge har Sverige en stor andel produksjon gjennom vannkraft, og tradisjonelt sett er Norge og Sverige nettoeksportører av elektrisitet ved høy fyllingsgrad grunnet store mengder med nedbør. I perioder med lite nedbør, er disse landene nettoimportører fra de andre europeiske landene. Figur 3 viser hvordan nettoeksporten fra Norden<sup>4</sup> svingte hvert kvartal i perioden 2000 til 2014.

---

<sup>3</sup> Vannkraft som utbygges utover dagens kapasitet, og som søker sertifikatstøtte vil også bli referert til som grønn energi.

<sup>4</sup> Norden: Norge, Sverige, Danmark og Finland

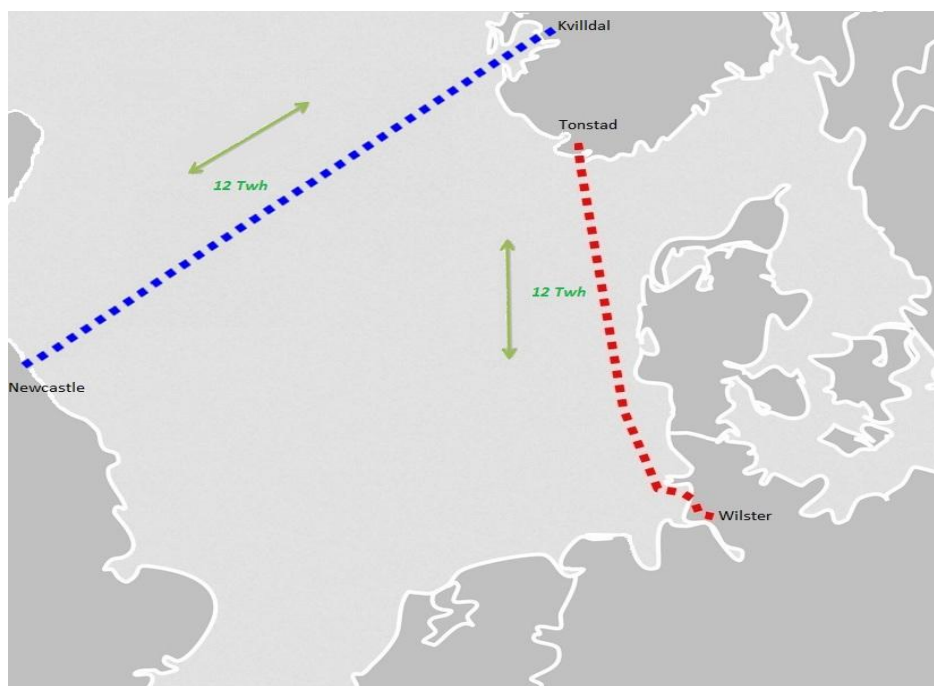


Figur 3: Kraftutveksling i Norden, hentet fra NVEs kvartalsrapport, 4. kvartal 2013

Statnett søkte Olje- og Energidepartementet(OED) i 2003 om tilrettelegging av kabel med Storbritannia. Konsesjonssøknaden ble avslått grunnet usikkerhet rundt den samfunnsøkonomiske lønnsomheten(OED 2003). 15. mai 2013 leverte Statnett inn en ny konsesjonssøknad for utbygging av kabel med Tyskland og Storbritannia. Argumentet Statnett la frem var bl.a. (Lont & Borgen 2013):

1. Kablene vil øke verdiskapningen i Norge og være samfunnsøkonomisk lønnsomt
2. Forsyningssikkerhet styrkes, spesielt i tørre år
3. Bidra til å støtte handelspartnere i omlegging av energisystemene, samt utvikling av en mer klimavennlig energisektor i Europa gjennom fornybarsatsningen som er vedtatt i Norge og Sverige.

November 2014 fikk Statnett konsesjon for begge utlandsforbindelsene. Hver av kablene er planlagt til 1400 MW (rundt 12 TWh pr år), hvor kabelen mot Tyskland skal settes i drift 2018 og Storbritannia 2020. Til sammen vil dette øke Norges kapasitet for kraftutveksling med utlandet med nesten 50 prosent(Energidepartementet 2014). Figur 4 viser de planlagte sjøkablene som vil være i drift senest 2020.



**Figur 4:** Sjøkablene mot Tyskland og Storbritannia, på rundt 1400MW hver

Analyseselskapet Markedskraft anslår at nettoeksporten mot Tyskland vil være tilnærmet lik null i 2020. I Tyskland svinger prisene stort mellom dag og natt sammenlignet med Norden. Aktørene i det europeiske kraftmarkedet kjøper da billig nattkraft i Tyskland og overfører det nordover så mye som nettet har kapasitet til, og kjøper dagkraft relativt billig i Norden og transportere den sørover (Bøhnisdalen et al. 2013). Mot Storbritannia forventes det en nettoeksport på 10 TWh i 2020. Markedskraft mener derfor at nesten hele kraftoverskuddet fra sertifikatmarkedet i Norge (13,2 TWh) vil bli eksportert til Storbritannia (Sættem 2014).

Debatten rundt disse kablene er knyttet til de faktiske effektene. Statnetts 3 hovedargumenter for utbygging har fått bred støtte av bransjen (Sættem 2014). Likevel er det skepsis til om Norge kommer bedre eller dårligere ut, og om en mulig høyere kraftpris er bra for forbrukerne i Norge. I rapporten skriver Statnett om flere usikkerhetsmomenter som vil gi ulike utfall for verdien av kablene. Ikke alle er enig med Statnetts egen konklusjon om å utbygge, og diskusjonen fortsetter per dags dato (Viggen 2014).

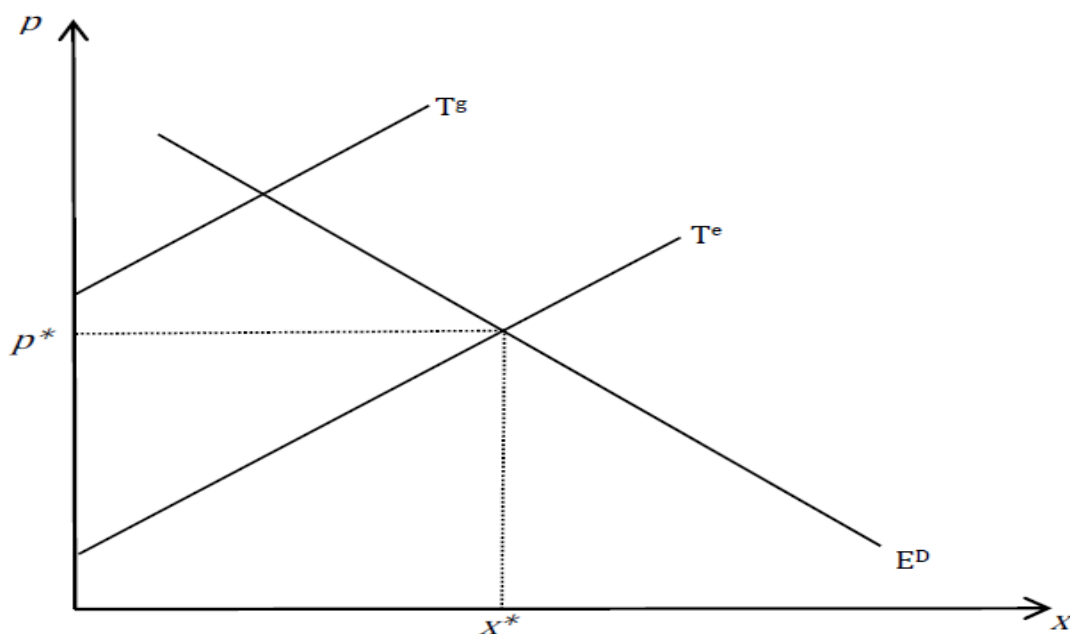


### 3. Elektrisitetsmarkedet og det grønne sertifikatmarkedet

Kapitlet vil se nærmere på tilpasning i elektrisitetsmarkedet under autarki og i en åpen økonomi. Tilslutt vil det grønne sertifikatmarkedet presenteres med en kombinasjon av effektene knyttet til subsidie og avgift. Det gjøres antagelse om fri konkurranse i modellene som blir presentert.

#### 3.1 Elektrisitetsmarkedet under autarki

Markedet er definert ved to typer energi, en vanlig og en grønn. Den vanlige teknologien i Norge er vannkraft, mens den fornybare (som kan få støtte gjennom sertifikatordningen) er gjerne utvidet kapasitet utover dagens produksjon i Norge (av vannkraft) eller annen type fornybarteknologi. I dette markedet møtes produsentene og konsumentene av elektrisitet. Oppgaven ser vekk fra forhandlerleddet, og ser produsent og tilbyder som samme enhet.



Figur 5: Den grønne teknologien er ikke konkurranse dyktig i dette markedet

Under antagelsen om autarki, antar vi for enkelthets skyld at vi har en produsent med to teknologier, og en representativ konsument som etterspør energi. Tilbudskurven i dette markedet reflekterer de langsiktige tilbudskurvene ved antagelse om frikonkurranse. Under denne antagelsen vil tilbudskurven reflektere marginalkostnadene i produksjon. Den vanlige og fornybare teknologien produserer energi som er substitutter i konsumentens øyne, altså vil den rimeligste energien bli handlet først av konsumenten i markedet. Figur 5 viser hvordan tilpasningen vil bli ved tilbud fra produsent med vanlig ( $T^e$ ) og grønn ( $T^g$ ) energi.

Illustrasjonen viser en situasjon der grønn energi ikke er konkurransedyktig, og blir ikke produsert. Prisen i markedet er lavere enn kostnaden av å produsere gjennom grønn energi. Det totale tilbudet er her derfor gitt ved  $T^e$ , som skjærer i etterspørselskurven til konsumenten vist ved  $E^D$ . Likevektsprisen og kvantumet oppstår i dette skjæringspunktet og er gitt ved  $x^*$  og  $p^*$ .

### 3.2 Elektrisitetsmarkedet ved internasjonal handel

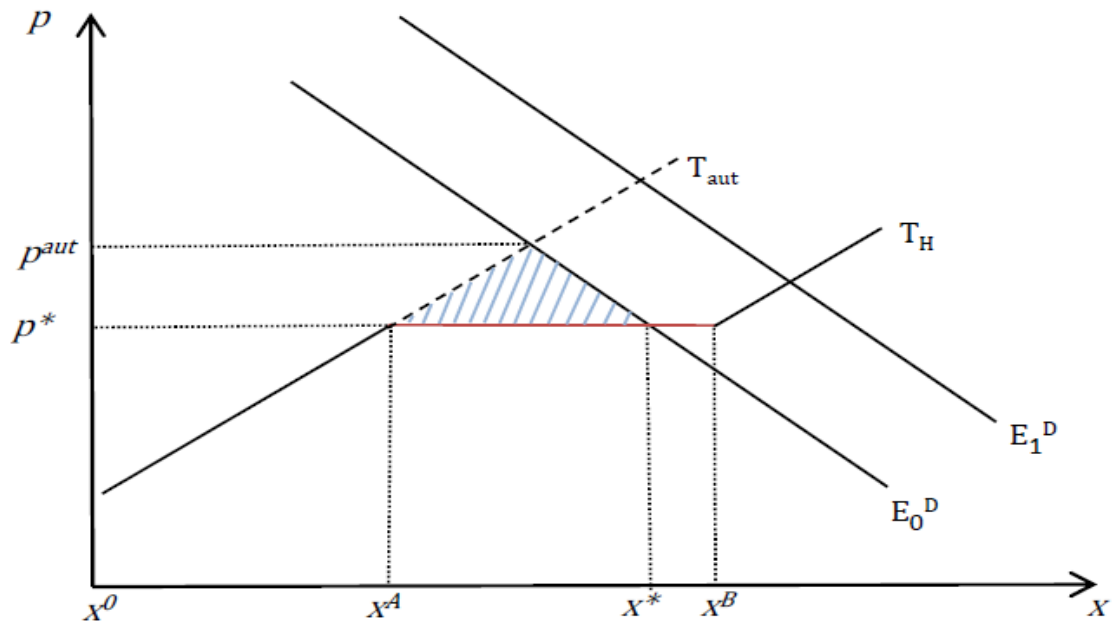
Vi kan prinsipielt tenke på fysisk overføring av kraft på to ulike nivåer, over landegrenser eller områder innad i et land (Førsund 2007, s.121). I oppgaven er fokuset på handel på tvers av landegrenser mellom tre land. I første omgang gjøres det antagelse om overføring til/fra verdensmarkedet med ubegrenset overføringskapasitet<sup>5</sup> og ser kun på den aggregerte handelen i oppgaven. For enkelhetsskyld er det totale tilbudet i markedet av vanlig og grønn energi gitt ved én tilbudskurve. Produsenten av begge teknologiene (samt konsumenten) vil stå ovenfor en internasjonalpris, og med antagelsen om at produsenten er en liten aktør og pristaker på det store internasjonale markedet. Omsatt mengde på det internasjonale kvantumet er større enn innlandsmarkedet.

#### 3.2.1 Import

I en importsituasjon importeres det elektrisitet til innlandsmarkedet, og med relativ stor overføringskapasiteten vil tilbudet fra utlandet være uendelig elastisk rundt skjæringspunktet (Bye 2003, s.12). I figur 6 er innlandsetterspørselen gitt ved den fallende kurven  $E_0^D$ , og det totale innlandstilbudet av kraft  $T_H$  i likevekt er gitt til venstre for punktet  $x^A$ .  $T_{aut}$  viser totaltilbudet i markedet under et autarki. Kapasiteten for import er differansen mellom  $x^A$  og  $x^B$ . Likevekten i markedet er gitt ved punktet  $(x^*, p^*)$ , hvor mengden  $(x^* - x^A)$  er den importerte mengden av elektrisitet. Ved mulighet for import er det samfunnsøkonomiske overskuddet større enn under et autarki. Gevinsten er vist ved det skraverete området i figuren, og autarkiprisen er  $p^{aut} > p^*$ .

---

<sup>5</sup> Relativ høy overføringskapasitet som ikke gir begrenset mengde med flyt mellom områdene ved behov, vil videre i oppgaven bli referert til som ubegrenset overføringskapasitet.



Figur 6: Import gir økt samfunnsøkonomisk overskudd

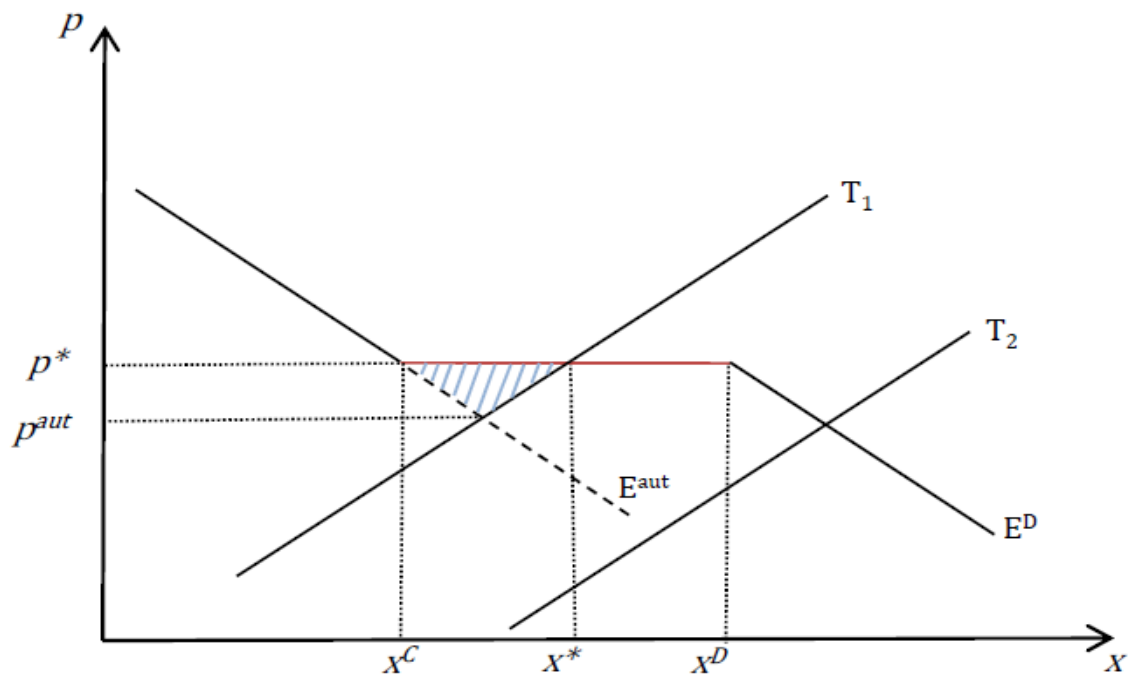
### 3.2.2 Eksport

Hvis vi reverserer handelen, vil innlandsprodusenten være en eksportør som står ovenfor høyere betalingsvillighet på verdensmarkedet enn under autarki. Dette vil føre til høyere innlandspriser for konsumentene og produsentene.

Tilbudskurven  $T_1$  er det totale innlandstilbudet av energi. I figur 7 er likevekten i markedet vist ved punktet  $(x^*, p^*)$ , hvor mengden  $(x^* - x^C)$  er den eksporterte mengden og kabelkapasiteten er  $(x^D - x^C)$ .  $E^{aut}$  viser etterspørselen innlands ved autarki.

Ved å åpne opp markedet for internasjonal handel vil konkurransen mellom importører/eksportører drive innlandsprisen lik den internasjonale prisen. For markedet i figuren vil dette føre til økt samfunnsøkonomisk overskudd vist ved det skraverte området, men en autarkipris som er  $p^{aut} < p^*$ .





Figur 7: Mulighet for eksport øker det samfunnsøkonomiske overskuddet

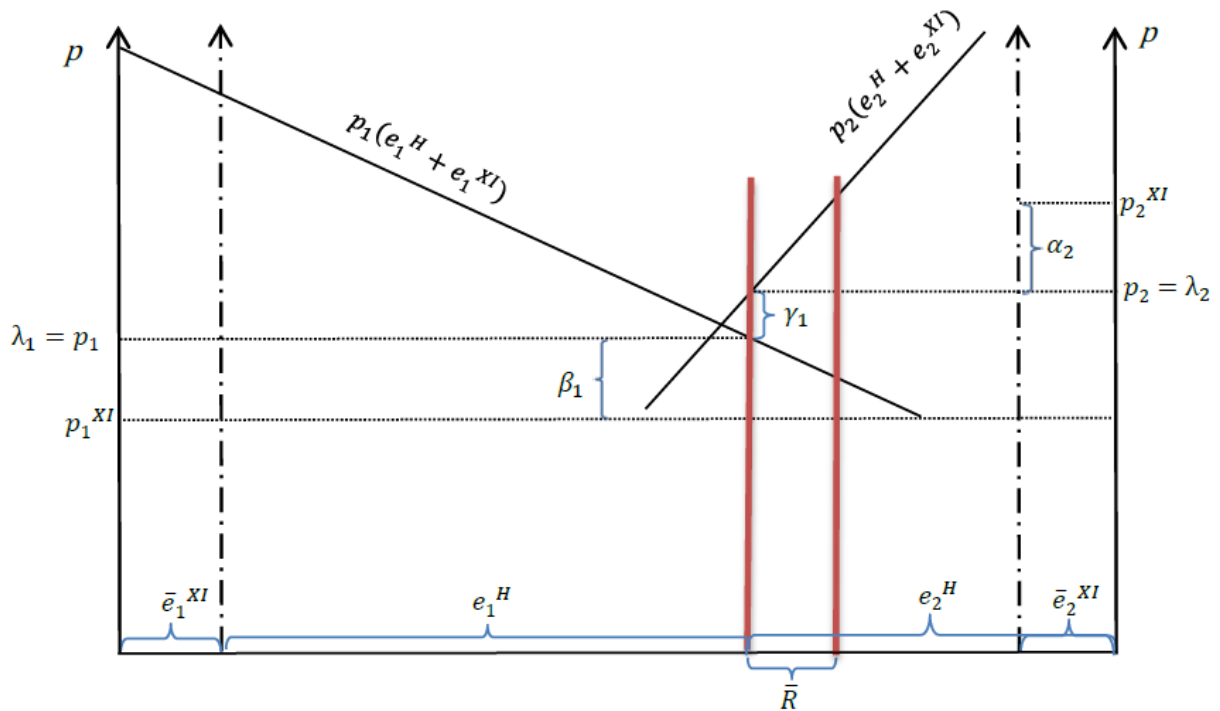
### 3.2.3 Begrenset overføringskapasitet

Hvis etterspørselen i figur 6 var gitt ved  $E_1^D$  og tilbudet i figur 7 ved  $T_2$ , er den potensielle mengden som kan importeres/eksporteres større enn overføringskapasitet. Det oppstår da en skranke, eller flaskehals, på overføring og den samfunnsøkonomiske lønnsomheten blir mindre enn ved økt overføringskapasitet. Vi har altså en situasjon med begrenset overføringskapasitet. På grunn av stor mengde vannkraftproduksjon i Norge, vil oppgaven presentere en ny modell som forklarer tilpasningen som skjer i innlandsmarkedet ved begrenset overføringskapasitet<sup>6</sup>.

Figur 8 illustrerer et badekardiagram på kortsikt, hvor produsenten har en gitt mengden med vann tilgjengelig over en bestemt perioden. Diagrammet kan gjenspeile et årlig værstryklus for vannkraftprodusenten. Tilsiget av vann til reservoarene er størst i vårperioden, og en kan derfor anta at perioden er fra våren år  $t$ , til våren år  $T$ . Vannkraftprodusenten står ovenfor fallende etterspørselskurver, og siden modellen er på kortsikt er de marginalkostnadene for produsenten lik null (Førsund 2007). Det innføres betingelsen om én representativ produsent, begrenset kapasitet på kabelen mot resten av verden og begrenset lagring av vann (lagerskranke). Innlandsmarkedet er lite i forhold til resten av verden, prisen på verdensmarkedet er eksogent gitt. Modellen gjør antagelser om et marked med fri konkurranse.

<sup>6</sup> Se vedlegg 10.1 for forklaring samt antagelser av modellen (Førsund 2007).

I diagrammet illustreres tilpasningen over 2 perioder. For en tilpasning ved ubegrenset overføringskapasitet og ingen skranker i modellen, forklares og illustreres dette i vedlegg 10.1



**Figur 8:** Vannkraftprodusentens tilpasning ved begrenset import og eksport

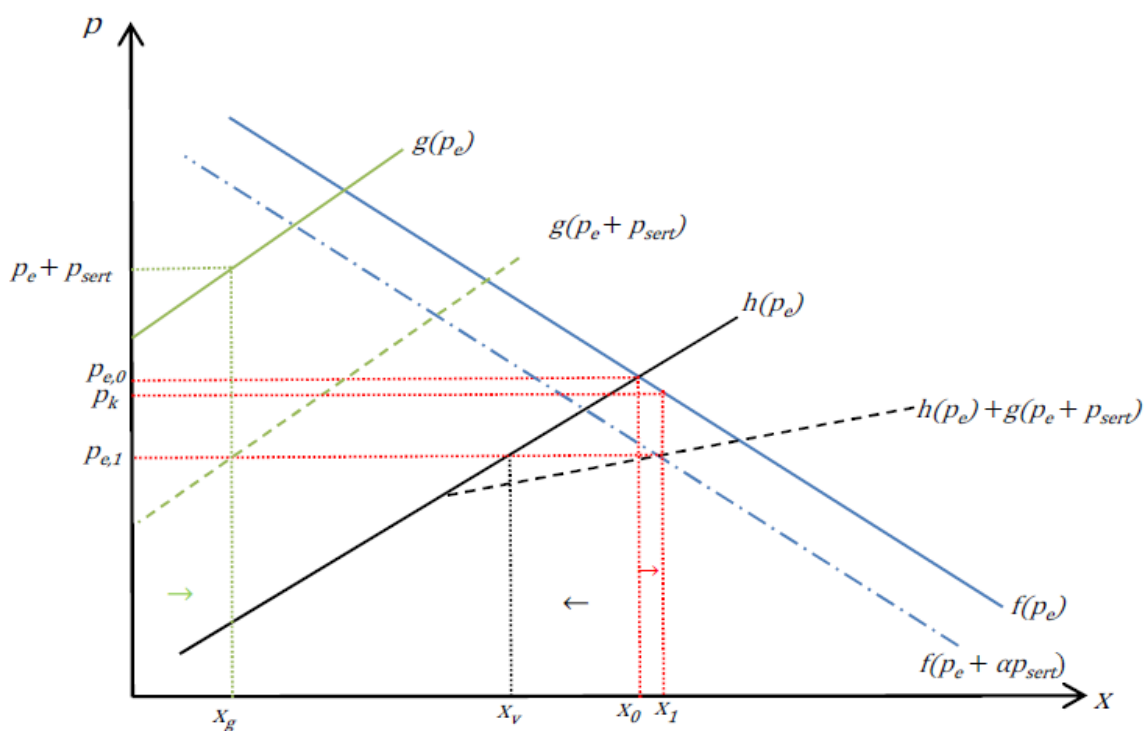
Prisen i innlandsmarkedet er i periode 1 og 2 henholdsvis  $p_1$  og  $p_2$ , og er ulik prisen på verdensmarkedet over de to periodene  $p_1^{XI}$  og  $p_2^{XI}$ . Det importeres en begrenset mengde med kraft  $\bar{e}_1^{XI}$ , mens eksport fra innlandsmarkedet i periode 2 er begrenset til  $\bar{e}_2^{XI}$ . Skyggeprisen på overføringskapasiteten for henholdsvis import og eksport er  $\beta_1$  og  $\alpha_2$ . Vannkraftprodusenten i innlandsmarkedet produserer henholdsvis  $e_1^H$  og  $e_2^H$  i periodene. Med begrenset lagring av vann  $\bar{R}$ , og en antagelse om at produsentene ikke får lov til å dumpe vann, oppstår det også en skyggepris for lagring  $\gamma_1$ .

Vannverdien  $\lambda_1$  og  $\lambda_2$ , i modellen blir den samme som prisen i innlandet. Modellen viser at vannkraftprodusentens tilpasning i en slik situasjon ikke vil være samfunnsøkonomisk lønnsomt grunnet muligheten for økt økonomisk verdi, vist ved skyggeprisene. Med økt overførings- og lagerkapasitet vil  $p_1^{XI} = p_1 = \lambda_1$  og  $p_2^{XI} = p_2 = \lambda_2$ . Dette ville gi økt samfunnsøkonomisk lønnsomhet ved at arealet under etterspørselskurvene blir større, altså øker det samfunnsøkonomiske overskuddet. Ved en slik tilpasning vil det importeres kraft i hele periode 1 og eksporteres i periode 2, slik det er forklart i vedlegg 10.1.

### 3.3 Grønne sertifikatmarkedet

Figur 1 og 2 illustrerte effektene av henholdsvis subsidie ved produksjon og avgift ved konsum. Ved innføring av grønne sertifikatmarkedet er det en kombinasjon av disse to effektene som gjenspeiler pris og volum i markedet<sup>7</sup>.

Før sertifikatmarkedet innføres er tilbudet av vanlig energi gitt ved  $h(p_e)$ , etterspørsel  $f(p_e)$ , og likevekten i markedet er  $(x_0, p_0)$ . Tilbudskurven for grønn energi er gitt ved  $g(p_e)$ , og på grunn av marginalkostnad som er høyere enn prisen i markedet er ikke den grønne teknologien konkurransedyktig og blir ikke produsert. Tilbudet i markedet før introduksjon av sertifikater er derfor kun gitt ved tilbudet av den vanlige teknologien.

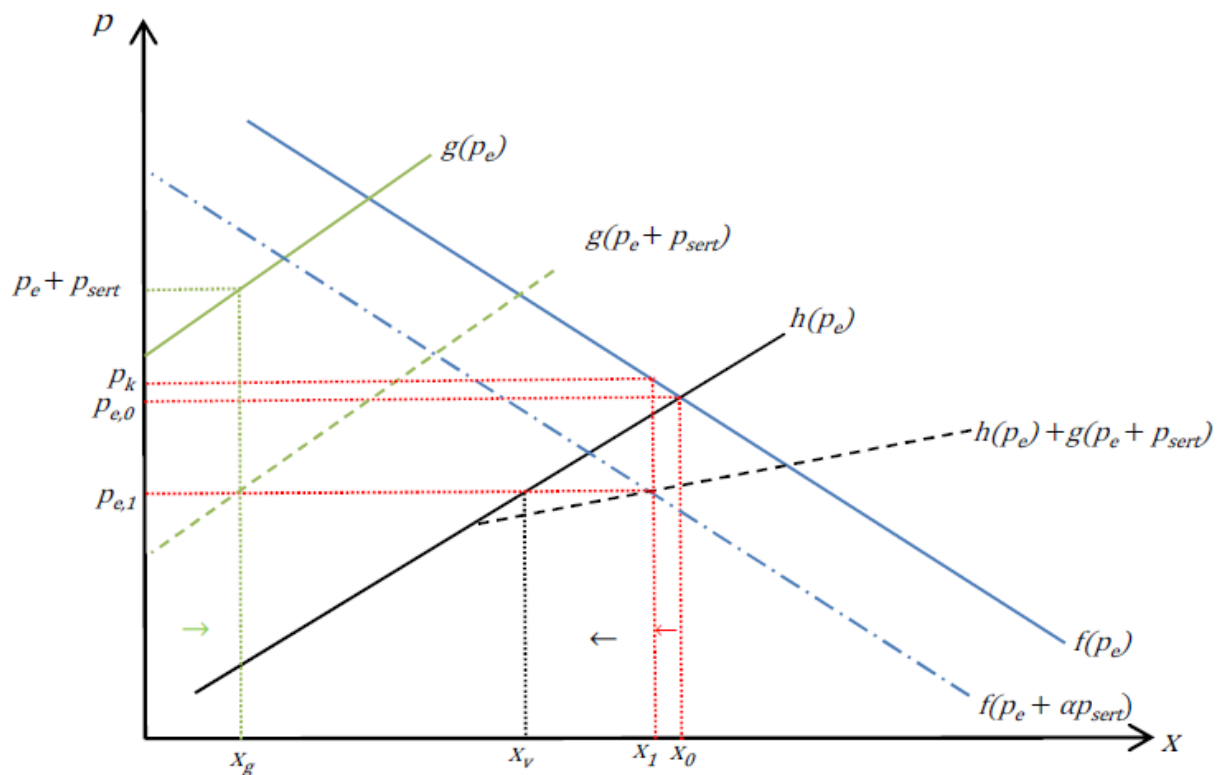


Figur 9: Markedets tilpasning med grønne sertifikater, total omsattmengde øker

Det innføres et grønt sertifikatmarked med et bestemt andelskrav  $\alpha$ . Sertifikatprisen  $p_{sert}$ , er en ekstra inntekt pr. enhet utover energiprisen  $p_e$ , som produsenten av grønn energi mottar slik at prisen for grønn energi er  $|p_g = p_e + p_{sert}|$ . Sertifikatprisen er differansen mellom den ordinære tilbudskurven for grønn energi  $g(p_e)$ , og grønn energi med sertifikater  $g(p_e + p_{sert})$ . Det nye totaltilbudet i markedet er dermed gitt ved  $|h(p_e) + g(p_e + p_{sert})|$ , som er en horistontal addisjon av det vanlige- og nye grønnetilbudet.

<sup>7</sup> Figur 9 og 10 tar utgangspunkt illustrasjonen fra Bye(2003, s. 12)

Antar en nå at etterspørselseffekten er sterkere, kan dette illustreres med et større skift innover slik i figur 10. Den nye konsumentprisen blir nå  $p_k > p_{e,0}$ , og total omsattmengde energi faller i markedet. Nå virker avgiftseffekten sterke enn det ble illustrert i figur 9, og totaleffekten av volum og pris blir ikke den samme. Konsumentprisen øker, mens omsattmengde vanlig energi ( $x_v$ ), totaltilbudet ( $x_1$ ) og energiprisen ( $p_{e,1}$ ) faller.



Kombinasjonen av subsidie- og avgiftseffekten (slik forklart i kapittel 2.2.1) vil gi et udefinert utfall. Gitt at en pålegger forbrukeren en kjøpsplikt for sertifikatene, så er det ikke opplagt at kostnadene for forbrukeren øker. Det er heller ikke opplagt hva som faktisk skjer med den omsatte mengden i markedet etter innføring av et grønt sertifikatmarked. Både forbrukerprisen og total omsattmengde energi kan øke eller redusere i markedet. Det eneste

som er sikkert er at energiprisen for produsenten av vanlig energi vil falle, og mengden grønn energi i markedet vil øke. Hvor stor disse effektene blir vil avhenge av elastisitetene for tilbyder og forbruker i markedet.

## 4. Teoretisk analyse

Den analytiske tilnærmingen samt metoden som er brukt i oppgaven er inspirert av artikkelen ”On the Price and Volume Effects from Green Certificates in the Energy Market”(Bye 2003) og ”Grønne og hvite sertifikater iblandet sort”(Bye & Amundsen 2012). Kapitlet vil presentere antagelser og forenklinger i modellen, og den matematiske modellen som danner grunnlaget for simuleringsanalysen i kapittel 6.

### 4.1 Antagelser

I modellen forenkles energimarkedet til å bestå av én representativ produsent, som tilbyr energi gjennom tradisjonell- og grønn teknologi. Produsenten står ovenfor én representativ konsument som etterspør kraft, hvor konsumenten er pålagt å etterspørre en andel grønnenergi<sup>8</sup>. Sertifikatet vil legges direkte på konsumentensiden, og energien som tilbys er et gode og substitutt for forbrukeren.

Markedet består av rasjonelle aktører, hvor ingen utnytter markedsrett. Det er et marked åpent for internasjonalhandel med mulighet for flyt av kraft mellom de tre landene, hvor ett av landene har innført en grønn sertifikatordning. Modellen er statisk og forutsetter årlige tall.

### 4.2 Modellen

#### 4.2.1 Etterspørselssiden

Forbrukerne er pålagt å kjøpe en bestemt andel grønn energi gjennom sertifikater. I brukerens øyne er elektrisitet et substitutt og etterspør både vanlig energi og en fast andel grønn energi. Forbrukeren i land  $i$  er rasjonell og vil etterspørre på en slik måte at nytten  $u(x_i^D)$ , maksimeres gitt prisen på energi  $p_i$ .

$$\max u(x_i^D) - p_i x_i^D \quad (1)$$

Den totale etterspurte mengden i land  $i$ , er fra vanlig energi  $e$ , grønn energi  $g$ , og en nettoeksport fra land  $i$  til land  $n$ . Hvor  $\sum_{i \neq n} x_{i,n} < 0$ , når kraft importeres fra land  $n$ .

$$x_i^D = x_{i,e} + x_{i,g} - \sum_{i \neq n} x_{i,n} \quad (2)$$

---

<sup>8</sup> Forenklingen er ikke avgjørende for selve resultatet.

Prisforhold vil bestemme sammensetningen forbrukeren vil etterspørre. Godene er perfekte substitutter, og konsumenten opplever økt nytte ved konsum. Den optimale tilpasningen gitt antagelsen om nyttemaksimering er oppnådd når marginalnyttens er lik prisen på godet (Strøm & Vislie 2007).

$$\frac{\partial u}{\partial x_i} = p_i(x_i^D) \quad (3)$$

#### 4.2.2 Tilbudssiden

Tilbyderen i dette markedet tilbyr vanlig energi, og grønn energi gjennom sertifikatordningen. I Norge vil energien bestå av vannkraft som er den tradisjonelle energien, og grønn energi. I Tyskland og Storbritannia vil energitilbudet kun bestå av tradisjonell energi. Sertifikatordningen innføres kun i Norge.

Tilbudet av vanlig energi er en funksjon av prisen på energi

$$x_{i,e}^T = h(p_i) \quad (4)$$

Tilbudet av grønn er en funksjon av prisen på energi og sertifikatprisen, som sammen utgjør prisen for grønn energi.

$$x_{i,g}^T = g(p_i + P_{sert}) \quad \text{eller} \quad x_{i,g}^T = g(p_{i,g}) \quad (5)$$

Det totale tilbudet i landet er av vanlig og grønn, minus en nettoeksport fra land  $i$  til  $n$ .

$$x_i^T = x_{i,e} + x_{i,g} - \sum_{i \neq n} x_{i,n}$$

Hvor  $\sum_{i \neq n} x_{i,e} < 0$  når det importeres fra land  $n$ . Begge tilbudene er antatt stigende i deres energipriser.

$$\frac{\partial h}{\partial p_i} > 0 \quad \text{og} \quad \frac{\partial g}{\partial p_{i,g}} > 0 \quad (6)$$

Prisen som produsenten av grønn energi mottar er energiprisen pluss sertifikatprisen.

$$p_{i,g} = p_i + p_{sert} \quad (7)$$

Under antagelsen om én profittmaksimerende produsent av de to teknologiene, vil følgende uttrykk avgjøre tilbudet fra produsenten med vanlig teknologi  $e$ , og grønn energi  $g$ .

$$\max \pi(x_{i,e}, x_{i,g}) = p_i x_{i,e} + (p_i + p_{sert}) x_{i,g} - c(x_{i,e}, x_{i,g}) \quad (8)$$

Kostnaden  $c$  vil være ulik for produsenten gitt teknologien som produseres.

Under autarki, kan prisen innenlands og utenlands være  $p_i = p_n$  eller  $p_i \neq p_n$  og avgjøres av de lokale faktorene. Ved antagelse om åpent marked med ubegrenset overføring av kraft, vil prisen innenlands alltid være lik utenlands  $p_i = p_n = p_{sys}$ <sup>9</sup>. Dette vil danne én system-/energi pris som er felles for alle de tre landene. Ved en begrenset mengde med overføring som er lavere enn den potensielle kraftflyten, vil prisene igjen avhenge av lokale faktorer slik under et autarki. Under autarki eller med begrenset overføringskapasitet kan det tenkes at energiprisen er gitt ved én systempris, pluss en differanse (skyggepris) slik at:

$$p_i = p_{sys} + \pi_i \quad (9)$$

Hvor  $\pi_i$  kan være både positiv og negativ, men lik null når det er nok kapasitet for overføring.

#### 4.2.3 Likevektsløsning

Ønsket mengde grønn energi gjennom sertifikatpliktig kjøp, kan tvinges gjennom krav om andel av energikonsum som en funksjon av energi- og sertifikatpris. I modellen innføres det et slikt krav om andel  $\alpha_i$ , i land  $i$  uttrykt slik at

$$x_{i,g}^D = \alpha_i f_i(p_i + \alpha p_{sert}) \quad (10)$$

Det vil være et avvik mellom prisen konsumentene betaler, og prisen produsenten forholder seg til under sertifikatordningen. Konsumentene er nå pålagt til å betale subsidien for grønn energi, vist i (10). Konsumentprisen i land  $i$ , kan skrives som en vektet andel mellom energi- og sertifikatprisen

$$p_{i,k} = (1 - \alpha_i)p_i + \alpha_i p_{i,g} \quad \text{eller} \quad p_{i,k} = p_i + \alpha_i p_{sert} \quad (11)$$

Siden de to andre markedene ikke har sertifikatordningen vil de kun forholde seg til energiprisen slik at deres konsument- og energipris er lik, og  $\alpha = 0$  i deres land. Under antagelse om begrenset overføring vil energiprisen være forklart med (9). Den nye etterspørselsfunksjonen  $f$ , i land  $i$ , vil dermed være en funksjon av prisen på den vanlige teknologien  $p_i$ , og en andel av sertifikatprisen  $p_{sert}$

$$x_i^D = f_i(p_i + \alpha_i p_{sert}) \quad (12)$$

---

<sup>9</sup>  $p_{sys}$  =systempris



I modellen gjøres det antagelser om at etterspørselsfunksjonen er avtagende. I likevekten må tilbudet av kraft i land  $i$  og etterspørselen være lik. Likevektsløsningen er dermed gitt ved

$$(1 - \alpha_i)f_i(p_i + \alpha_i p_{sert}) = h_i(p_i) \quad (13)$$

$$\alpha_i f_i(p_i + \alpha_i p_{sert}) = g_i(p_i + p_{sert}) \quad (14)$$

Hvor (13) og (14) er likevekten for henholdsvis energi- og sertifikatmarkedet. Tilbudet av tradisjonell i land  $i$  vil ikke si kun innlandsproduksjon, men også evt. import fra land  $n$  når det er en åpen økonomi. (14) kan alternativt skrives om til<sup>10</sup>

$$\alpha_i f_i(p_{i,g} - (1 - \alpha_i)p_{sert}) = g(p_{i,g}) \quad (15)$$

Videre deriveres likevektbetingelsen med hensyn på  $\alpha_i$ . Likevektslikningen for energi- og sertifikatmarkedet vil dermed bli

$$[(1 - \alpha_i)f'_i - h'_i] \frac{\partial p_i}{\partial \alpha_i} + (1 - \alpha_i)\alpha_i f_i \left( \frac{\partial p_{sert}}{\partial \alpha_i} \right) = f_i - (1 - \alpha_i)f'_i p_{sert} \quad (16)$$

$$(\alpha_i f'_i - g'_i) \frac{\partial p_i}{\partial \alpha_i} + (\alpha_i^2 f'_i - g'_i) \frac{\partial p_{sert}}{\partial \alpha_i} = -f_i - \alpha_i f'_i p_{sert} \quad (17)$$

For nærmere opplysninger om utregning og antagelsene som er gjort videre i kapitlet refereres til vedlegg 10.2.

**Energiprisen  $p_i$  faller ved økt andelskrav  $\alpha_i$ ,  $\frac{\partial p_i}{\partial \alpha_i} < 0$**

$$\frac{\partial p_i}{\partial \alpha_i} = \frac{-f'_i [\alpha_i f_i + (1 - \alpha_i)g'_i p_{sert}] + f_i g'_i}{(1 - \alpha_i)^2 f'_i g'_i + \alpha_i^2 f'_i h'_i - g'_i h'_i} < 0 \quad (18)$$

Med antagelsene (som vist i vedlegget) om  $f'_i < 0$ , og  $h'_i, g'_i > 0$ , blir uttrykket i (18) negativt. I modellen er energiprisen fallende når kravet om sertifikatandelen øker.

**Endring i sertifikatprisen ved endring i andelen  $\alpha_i$  er ikke definert**

$$\frac{\partial p_{sert}}{\partial \alpha_i} = \frac{f_i f'_i - f_i (g'_i + h'_i) + f'_i p_{sert} [(1 - \alpha_i)g'_i - \alpha_i h'_i]}{(1 - \alpha_i)^2 f'_i g'_i + \alpha_i^2 f'_i h'_i - g'_i h'_i} \quad (19)$$

Telleren i uttrykket i (19) er ubestemt. For å forstå hvorfor, kan en se nærmere på det siste leddet. Gitt antagelsene om  $f'_i < 0$ , og  $f, h'_i, g'_i > 0$ , vil  $(1 - \alpha_i)g'_i > \alpha_i h'_i$  gjøre telleren

---

<sup>10</sup>  $p_i + \alpha_i p_{sert} = p_i + p_{sert} - p_{sert} + \alpha_i p_{sert}$   
 $= p_{i,g} - (1 - \alpha_i)p_{sert}$

negativ. Manipulerer vi denne får vi at  $\frac{g'_i}{h'_i} > \frac{\alpha_i}{(1-\alpha_i)}$ . Altså vil sertifikatprisen øke ved økt krav om andelen av grønn teknologi (økt andel krav av sertifikat). Skulle  $h'_i = g'_i$  vil en størrelse på  $\alpha_i < 50\%$  gjøre uttrykket i (19) positiv, altså når andelen grønn energi er mindre enn tradisjonell. Men sertifikatprisen vil også øke når  $|f'_i f'_i - f_i(g'_i + h'_i)| > |f'_i p_{sert}[(1 - \alpha_i)g'_i - \alpha_i h'_i]|$  holder. Altså viser dette at effekten på sertifikatprisen ved økt  $\alpha_i$  er uklart grunnet flere faktorer som kan gjøre telleren både positiv og negativ.

### Endringen i energiprisen for grønnprodusent kan være både positiv og negativ

Prisen som den grønne produsenten står ovenfor er definert i likning (7), og ved å derivere med hensyn på  $\alpha_i$  blir dette

$$\frac{\partial p_{i,g}}{\partial \alpha_i} = \frac{\partial p_i}{\partial \alpha_i} + \frac{\partial p_{sert}}{\partial \alpha_i} \quad (20)$$

Siden  $\frac{\partial p_i}{\partial \alpha_i} < 0$ , og  $\frac{\partial p_{sert}}{\partial \alpha_i}$  er udefinert, kan endringen i prisen på grønn energi være både positiv og negativ.

$$\frac{\partial p_{i,g}}{\partial \alpha_i} = \frac{1}{|A|} [(1 - \alpha_i) f_i f'_i - f_i h'_i - \alpha_i f'_i h'_i p_{sert}] \quad (21)$$

### Konsumentprisen kan både stige og falle med andelskravet

$$\frac{\partial p_{i,k}}{\partial \alpha_i} = \frac{\partial p_i}{\partial \alpha_i} + \alpha_i \frac{\partial p_{sert}}{\partial \alpha_i} + p_{sert} \quad (22)$$

Dette kan også uttrykkes som  $\frac{\partial p_{i,k}}{\partial \alpha_i} = \frac{|A_1|}{|A|} + \alpha_i \frac{|A_2|}{|A|} + p_{sert}$  eller

$$\frac{\partial p_{i,k}}{\partial \alpha_i} = \frac{1}{|A|} [f'_i ((1 - \alpha_i) g'_i - \alpha_i h'_i) - g'_i h'_i p_{sert}] \quad (23)$$

Endringen i energiprisen er negativ (18) mens endringen i sertifikatprisen er udefinert (19). Dette tilsier at (23) kan være positiv, negativ eller null. Ved å se nærmere på (23) er  $g'_i h'_i p_{sert} > 0$ , siden førstederiverte av begge funksjonene og sertifikatprisen er positiv. Hvis  $\frac{g'_i}{h'_i} > \frac{\alpha_i}{(1-\alpha_i)}$  holder, vil  $f'_i ((1 - \alpha_i) g'_i - \alpha_i h'_i) < 0$ , og  $\frac{\partial p_{i,k}}{\partial \alpha_i} > 0$ . Hvis  $h'_i = g'_i$ , vil dette kun holde så lenge andelen av  $\alpha_i < 50\%$ . Konsumentprisen vil også stige ved en endring i  $\alpha_i$  hvis  $|f'_i ((1 - \alpha_i) g'_i - \alpha_i h'_i)| < |g'_i h'_i p_{sert}|$  holder. Konsumentprisen kan både stige og falle i modellen, og det er usikkert hva som vil skje,  $0 \geq \frac{\partial p_{i,k}}{\partial \alpha_i} \geq 0$ .



## 5. Datamaterialet

Kapitelet presenterer datamaterialet brukt i simuleringsmodellen. Startverdiene er nødvendig for å kalibrere konstantleddene som består av pris, kvantum og elasticitet. Datamaterialet består av årlige verdier, og de årlig gjennomsnittlige elasticitetsverdiene vil bli referert til som langsiktige.

Datagrunnlaget for modellsimuleringen er hentet fra ulike kilder, primært er dette verdier målt i Norge, Tyskland og Storbritannia. I simuleringen er Norge landet med sertifikatordningen som kobler til Tyskland og Storbritannia for kraftutveksling. Det er viktig å understreke usikkerheten knyttet til de faktiske kostnadene av å produsere kraft, og NVE gjør sine forutsetninger når de estimerer kostnadene (NVE 2015). Bl.a. avhenger deres beregninger av utbyggingskostnader, kapasitet, beliggenhet, diskonteringsrente og pris på innsatsfaktorer. Kostnadsberegningene er gjort for levetiden av anlegget ved hjelp av Levelized Cost Of Energy (LCOE). Rapporten til NVE vil kun brukes for å anslå et antatt kostnadsnivå for grønn energi i modellen.

Simuleringsmodellen er spesifisert gjennom en Cobb-Douglas funksjon og detaljert tilnærming av modellen er utledet i vedlegg 10.3.

### 5.1 Elektrisitetsmarkedet i Norge

Det er foretatt flere empiriske studier knyttet til tilbuds- og etterspørsel elasticiteten i kraftsektoren. Studiene viser at etterspørsel elasticiteten ikke er konstant, og varierer gjennom døgn, uker, og sesonger. Empiriske studier finner også at elasticiteten kan endres med prisen. Modellen ser på årligforbruk, og vil derfor ta for seg elasticitetsverdier på langsiktig.

Johnsen (2001) estimerer etterspørsel elasticiteten i det norske markedet med et årlig snitt mellom  $-0,05$  og  $-0,35$ , mens Bye og Hansen (2008) beskriver etterspørsel elasticitet mellom  $-0,12$  og  $-0,42$ . Bye og Hansen viser bl.a. at priselasticiteten er signifikant høyere på vinterstid sammenlignet med sommeren, og på kortsikt er verdiene enda lavere. Tar vi dette med i betraktningen, kan det være en medvirkende årsak til eventuelle sprik i simuleringsresultatene ved bruk av ulike elasticitetsverdier. En ser også at de estimerte verdiene på det årlige snittet har et stort spenn. Målingene skiller også seg grunnet perioden de er analysert som kan være påvirket av noen ekstra kalde/varme år. Tilbudselasticiteten for produksjon av tradisjonell energi argumenteres av Bye (2003, s.16) å være på rundt  $0,3$ , mens det brukes en etterspørsel elasticitet på  $-0,1$ . Grunnet usikkerhet knyttet til de faktiske verdiene på elasticiteten, vil oppgaven bruke verdiene som Bye bruker i sin simulering av et lukket marked.

En sensitivitetsanalyse vil bli gjennomført for å analysere følsomheten ved ulike elastisitetskombinasjoner.

Det er knyttet usikkerhet til elektrisitetsforbruket i Norge mot 2020. Bye og Aune (2005) viser at det forventede forbruket frem mot 2030 estimeres til omtrent 140-159 TWh/år. Utfallet avhenger av flere scenarioer, og viser en prognose for årlig økt forbruk i snitt på 0,5-1,36 TWh/år. Forbruket i 2014 var på 125,9 TWh (NVE 2014), og gitt en årlig økning på 0,5 frem mot 2020, blir forbruket 128,4 TWh. I simuleringen er denne mengden satt til 130 TWh i Norge i 2020.

NASDAQ Commodities OMX er råvarebørsen for handel av futureskontrakter innen nordisk elektrisitet. Her kan det kjøpes og selges kontrakter for alt fra år til timer i døgnet. Pr. 19.mars 2015 var årskontrakten med levering i 2020 verdsatt til 29,25EUR/MWh<sup>11</sup>, og økende frem mot 2025. Den omsatte mengden pr. 19.mars er beskjeden, men kontraktene viser en forventning om økt energipris i tiden fremover. Med følgende informasjon er startprisen for kalibrering satt til 25 øre/kWh i Norge.

## 5.2 Elektrisitetsmarkedet i Tyskland og Storbritannia

Wolfram (1999) estimerer en gjennomsnittlig årlig etterspørselselastisitet i England og Wales på rundt  $-0,17$ . Analysen fra E.ON i 2011 (Madlener et al. 2011) estimerer en langsiktig elastisitet i Tyskland på rundt  $-0,16$  og i Storbritannia på  $-0,14$ . I oppgaven er verdiene fra E.ON benyttet, og det testes for sensitivitet ved ulike elastisiteter.

I Storbritannia er det fossilt(naturgass og kull) og kjernekraft som er de primære energikildene, altså den tradisjonelle(UK 2015). Til sammen har de en andel på nærmere 90 %. I Tyskland står fossilt for nærmere 70 % av produksjon, mens fornybar har en andel på 26 % (Vasagar 2015). En del av disse termiske anleggene er også av typen CHP (Combined Heat and Power) som leverer varme og kraft til nærområdet og har en bedre utnyttingsgrad av innsatsfaktorene. Dette kan medføre at kraftproduksjon fra fossilt er mer kostnadseffektivt enn kostnadene NVE estimerer i sin rapport<sup>12</sup>. I simuleringen er tilbudet fra Storbritannia og i Tyskland representert ved en totaltilbudskurve i hvert av landene.

Tilbudselastisiteten i disse markedene er satt til samme verdi som Bye(2003) på 0,3, som argumenterer med at tilbudet for tradisjonell- og grønn teknologi har den samme elastisiteten. I

---

<sup>11</sup> Tilsvarende rundt 25,23 øre/kWh, Pr. 19.3.2014 <http://www.exchangerates.org.uk>

<sup>12</sup> (NVE 2015)

likhet med tidligere vil disse verdiene bli testet for følsomheten ved ulike elastisitetskombinasjoner.

Quandls database viser en futureskontrakt pris for baseload i år 2018 på 55 øre/kWh<sup>13</sup> i Storbritannia, og NASDAQ 28 øre/kWh i Tyskland<sup>14</sup>. Den omsatte mengden av kontrakter er i likhet med de norske tilnærmet lik null. Med disse antagelsene, er startprisen for kalibrering satt til 55 øre/kWh i Storbritannia og 30 øre/kWh i Tyskland.

Elektrisitetsforbruket i Storbritannia var i 2013 på 373 TWh (Statista 2015) og i Tyskland på nærmere 530 TWh. Siden 2007 har etterspørselen etter kraft vært avtagende i begge land, og prognoser fra Prognos AG(2014) viser at denne trenden vil fortsette i Tyskland. Prognos AG anslår et årlig tysk forbruk i 2020 på 510 TWh. I England er det større usikkerhet til hvordan det fremtidige forbruket vil se ut. Tall fra DECC<sup>15</sup> viser en analyse av *normal* scenario på 1,25 % årlig gjennomsnittlig økning frem mot 2030, mens UKERC<sup>16</sup> viser til *ambisjos* scenario med tilnærmet uendret etterspørsel(Gardner 2011). I oppgaven settes energibalansen i simuleringen til 380 TWh pr år i Storbritannia og 510 TWh pr år i Tyskland.

### 5.3 Grønne sertifikatsektoren

En av antagelsene i simuleringen er at aktørene er rasjonelle. Dersom prisen på energi er lavere enn kostnadene for grønn energi, vil det ikke produseres gjennom grønn energi. Dette vil også si at teknologi som kvalifiseres for sertifikater, men som har en kostnad under eller lik energiprisen, allerede produserer før ordningen er innført. Og siden de allerede produserer, vil de kun søke om sertifikatstøtte ved utvidelse av kapasitet. I analysen legges det til grunn krav om økt andel grønn energi utover dagens energinivå, og dermed investeringer som er ulønnsomme før sertifikatene innføres i Norge.

NVE rapporten (2015) fastslår at mange av de rimeligste prosjektene i Norge er allerede bygget ut. Gjennom grønne sertifikater er det i større grad de ikke fullt så gunstige prosjektene som utgjør restpotensialet, og som eventuelt kan bli realisert. Vannkraft er i følge NVE den rimeligste fornybare teknologien i Norge utover dagens kapasitet. Med antagelsen om at store vannkraftverk ikke kan være en del av sertifikatordningen, må en se til en annen teknologi. I Norge er det vindkraft og mindre/mikro vannkraft som er de mest aktuelle teknologiene.

---

<sup>13</sup> £0,04739/kWh, Pr. 24.2.2015. <http://www.exchangerates.org.uk>

<sup>14</sup> €0,03178/kWh, Pr. 17.3.2014 <http://www.exchangerates.org.uk>

<sup>15</sup> UK Government Department of Energy and Climate Change

<sup>16</sup> UK Energy Research Centre

NVE viser til at det er gitt konsesjon til kraftverk som har relativ stor spenn i energikostnadene. Vindkraftverkene ligger på stabile kostnadsnivåer på rundt 40-45 øre/kWh, mens vannkraftverkene kan ligge på alt mellom 10-70 øre/kWh. Det er viktig å understreke usikkerheten knyttet til disse kostnadsestimeringene og forutsetningene som NVE har brukt for å fastslå kostnadene. Med hensyn på denne informasjon, vil simuleringen ta utgangspunktet i en start kalibreringspris for grønn teknologi på 40 øre/kWh. Ved en grønn energipris på 50 øre/kWh vil produsenten tilby 13 TWh. Dette vil medføre en produksjonskostnad for grønn teknologi som er for høy til å penetrere markedet uten hjelp fra sertifikatene.

Tilbudselastisiteten for produksjon av grønn energi er også satt til 0,3 (Bye 2003) og vil bli testet for ulike elastisitetskombinasjoner.

#### **5.4 Mulige svakheter med materialet**

Som tidligere diskutert i kapitelet er det knyttet usikkerhet til de fremskrevne verdiene. Kostnadene, elastisitetene, prisene og den fremtidige energietterspørselen er alle usikre faktorer. Analysene av disse er gjerne bygget på ulike scenarioer, og hvorvidt disse realiseres i 2020 er uklart.

De fremtidige valutakursene er også usikre. Prisene oppgitt i Quandl og NASDAQ er oppgitt i henholdsvis euro og britiske pund. De fremtidige valutakontraktene hos bl.a. CME er kun frem til september 2016, hvor ingen kjøp eller salg er gjennomført. En bør derfor ikke tillegge for stor vekt på de faktiske startverdiene som er brukt i analysen, men heller lese effektene som inntreffer i simuleringen.

Med antagelsen om tilbudet av grønn energi ser oppgaven vekk fra teknologisk fremgang som vil påvirke pris og det fremskrevne tilbudet. Bl.a. kan læringskurver bidra til kostnadsreduksjon og videre utvikling av teknologi.

En senere sensitivitetsanalyse vil indirekte teste for følsomheten av endringer i tilbud og etterspørsel. Dette vil gjenspeiles gjennom ulike verdier av elastisiteten for tilbud og etterspørsel i markedet.

## 6. Simuleringen

Ved hjelp av simulering analyseres effekten av endret krav om grønn energi, under et autarki og ved mulighet for overføring mellom land. Den teoretiske analysen viste ikke et konkret resultat for prisendring av konsum- og sertifikatpris ved endret krav om fornybar, derfor vil simuleringen se nærmere på disse effektene ved et utvalg realistiske verdier for variabler i den teoretiske analysen. Simuleringen baserer seg på den samme modellen som ble presentert i kapittel 4.

Analysen er gjennomført ved hjelp av programvaren *The General Algebraic Modeling System* (GAMS), som er et matematisk modellering- og optimeringsverktøy<sup>17</sup>. Den kalibrerte modellen som brukes i simuleringen blir gjennomgått i vedlegg 10.3, og GAMS-modellen er beskrevet i vedlegg 10.4.

Tilbudselastisiteten i markedene er satt til 0,3 for både tradisjonell- og grønn teknologi, slik redegjort for i kapittel 5. Forbrukerne ser på energi som substitutt, og vil etterspørre gitt konsumentprisen. Etterspørselen i modellen vil være en kombinasjon av tradisjonell samt en pålagt andel grønn energi, med etterspørselsetastisitet i Norge på  $-0,1$ . Det er kun Norge som har sertifikatordningen, og derfor kun forbrukerne i dette markedet som er pålagt subsidiestøtten. I Norge er energibalansen satt til 130 TWh før sertifikatet innføres, med en produsent av tradisjonell og grønn energi. Før sertifikatstøtte er det kun tradisjonell energi som leverer kraft til forbrukerne. Modellen gjør ikke antagelsen om et monopolmarked, men er forenklet ved at den ene produsenten er en representativ tilbyder i markedet.

Tilbudselastisiteten for den tradisjonelle energien i Storbritannia og Tyskland er satt til 0,3. Forbrukerne i Storbritannia og Tyskland har lik karakteristika som de norske, men er ikke pålagt å etterspørre en andel grønn energi. De er indifferente om hvor kraften kommer fra (akkurat som forbrukerne i Norge) og etterspør gitt prisen de må betale pr. enhet av godet. Elastisiteten er satt til  $-0,14$  i Storbritannia og  $-0,16$  i Tyskland, med omfanget av kraftmarkedet på 380 TWh og 510 TWh i henholdsvis Storbritannia og Tyskland.

Simuleringen vil først ta for seg Norge under autarki, deretter åpne opp for handel med ubegrenset kapasitet av overføring mellom landene, for så å sette en begrensning på 12 TWh

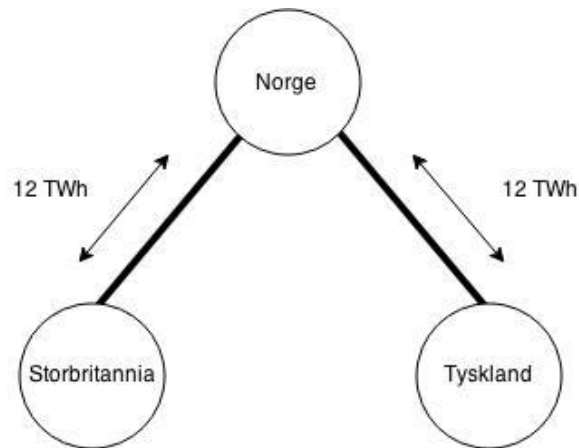
---

<sup>17</sup>Simuleringen er gjennomført på PC, med følgende spesifikasjoner:

OS:	Windows 7 64-bit
Prosesor:	Intel® Core™ i3-M350 CPU @ 2.27 GHz
RAM:	4GB
Programvare	GAMS 24.3.2 r47788 Released Aug 29, 2014 WEX-WEI x86
Solver:	MINOS



på hvert av sjøkablene. Analysen tar kun for seg disse tre landene og med kun mulighet for kraftoverføring mellom disse tre markedene, illustrert i figur 11. Analysen ser vekk fra annen politikk enn det grønne sertifikatmarkedet, og andre eksterne sjokk eller «rebound-effekter» som følge av endringer i andre markeder.



**Figur 11:** Mulighet for kraftoverføring skjer kun gjennom Norge i modellen

Analysen har som hensikt å illustrere pris- og volumeffektene i simuleringslandet Norge som oppstår ved innføring av krav om andel grønt. Første del av kapittelet vil kort ta for seg mulige endringer for Norge under autarki, og for en grundigere analyse vises det til Bye(2003). Andre del av kapitelet vil ta for seg resultatene dersom sjøkablene hadde hatt tilnærmet ubegrenset overføringskapasitet. Den tredje og siste delen presenterer resultatene med antagelsen om begrenset kraftflyt på 1400MW (rundt 12 TWh pr. år), som gir et marked for internasjonal handel men med begrenset mengde med kraftoverføring.

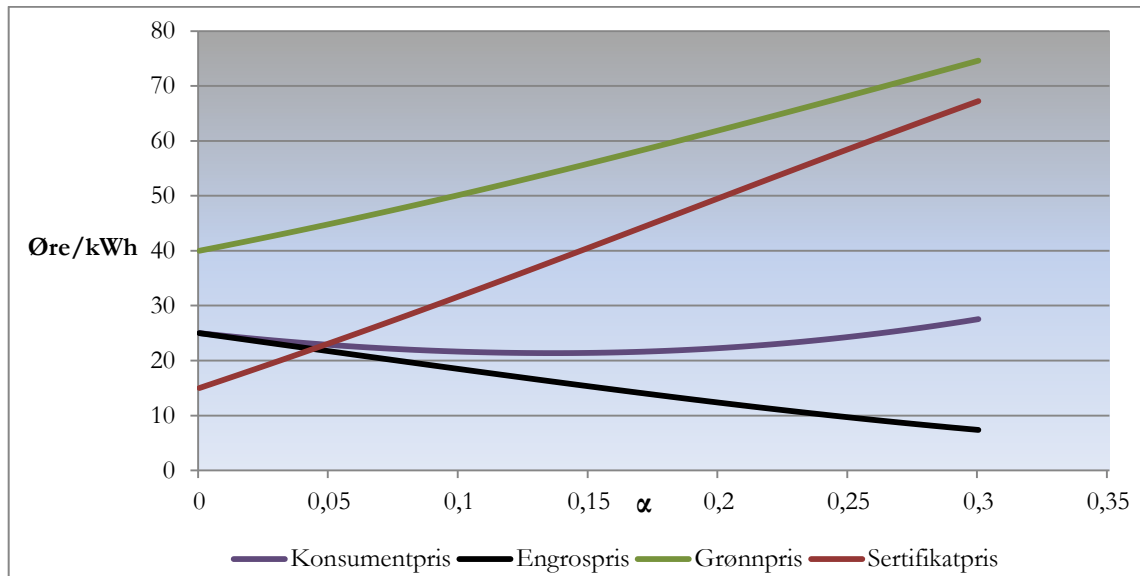
## 6.1 Norge under Autarki

### Pris- og volumeffektene i kraftmarkedet

Hypotesen forklarer at pris og volum er forventet å falle ved innføring av grønne sertifikater under et autarki. Det økte tilbudet av grønn energi reduserer prisen i kraftmarkedet, og lavere pris gjør den vanlige energien mindre lønnsom. Simuleringen kan ikke avkrefte hypotesen om redusert pris og volum av vanlig energi i kraftmarkedet. Figur 12 illustrerer prisen på den vertikale aksene, og kravet om grønt ( $\alpha$ ) på den horisontale aksene.

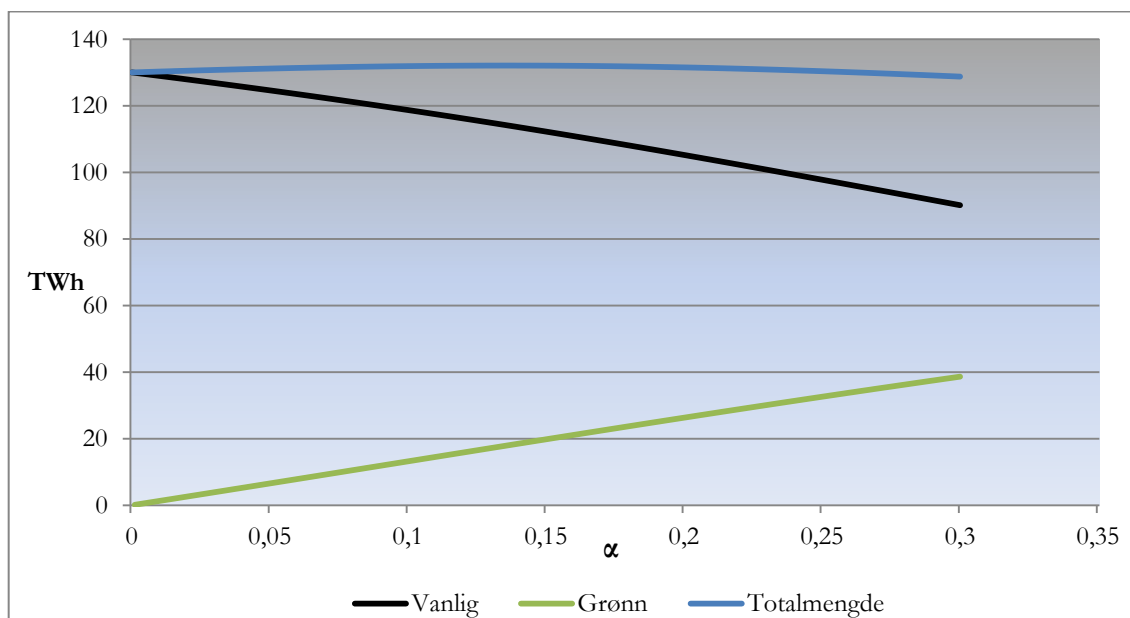
Økt krav om grønn energi fører til at kraftprisen(engrosprisen) i markedet faller grunnet økt tilbud av kraft, og prisen som den tradisjonelle produsenten vil motta er fallende, representert av den sorte kurven. Ved økte andelskrav øker prisen for å produsere grønt og

konsumentprisen (som var ubestemt i den teoretiske analysen) vil først falle, for så å tilta ifølge simuleringen.



Figur 12: Prisendring i Norge under autarki

Mengden av den vanlige energien avtar ved økte andel grønt. Den totale omsatte mengden (den blåkurven) har en konkav form og et maksimumspunkt på samme andel grønt som konsumentprisen har et minimumspunkt.



Figur 13: Volumendringene i Norge under autarki

### Pris- og volumeffekter i det grønne sertifikatmarkedet

Kravet om andel grønn energi er spesifisert som en prosentandel av det totale krafttilbudet i Norge. Økt andel grønt medfører lavere etterspørsel etter kraft grunnet økt konsumentpris, og

derfor er økningen i omsattmengde grønn avtagende i takt med fallende etterspørsel og total omsattmengde av kraft.

Sertifikatprisen er prisdifferansen mellom vanlig og grønn energi, og prisen øker med andelskravet i modellen. Prisdifferansen er subsidiestørrelsen som må tilføres den grønne produsenten (også illustrert teoretisk i figur 9 og 10) for at produsenten skal tilby kraft i markedet.

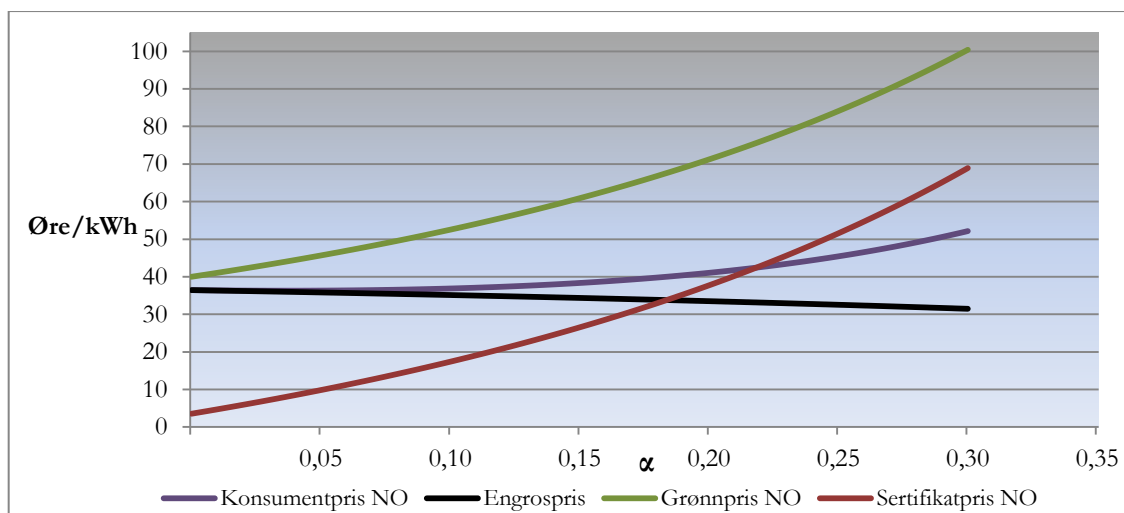
I den teoretiske analysen ble det vist at endringen i sertifikatprisen var uklart. Simuleringen viser økt sertifikatpris ved økt andel grønt, men at veksten avtar når reduksjonen i kraftprisen flater ut. Resultatet viser også at sertifikatprisen stadig utgjør en større andel av prisen til den grønne produsenten, grunnet synkende kraftpris i kraftmarkedet. Simuleringsresultatene ved autarki støtter tidligere forskning (Bye 2003; Bye & Amundsen 2012).

## **6.2 Åpent marked med ubegrenset overføringskapasitet**

Markedet åpnes i det følgende for mulighet av kraftoverføring mellom landene. I Norge tilbys kraft produsert ved hjelp av tradisjonell og grønn energi, mens Tyskland og Storbritannia kun har en tradisjonell. I figurene står *NX* for nettoeksportmengde fra Norge (NO), Tyskland (GER) og Storbritannia (UK). Flere grafiske tilpasninger for Tyskland og Storbritannia er lagt inn i vedlegg 10.5.1. Hovedfokuset i oppgaven vil være på effektene i Norge.

### **Pris- og volumeffektene i kraftmarkedet**

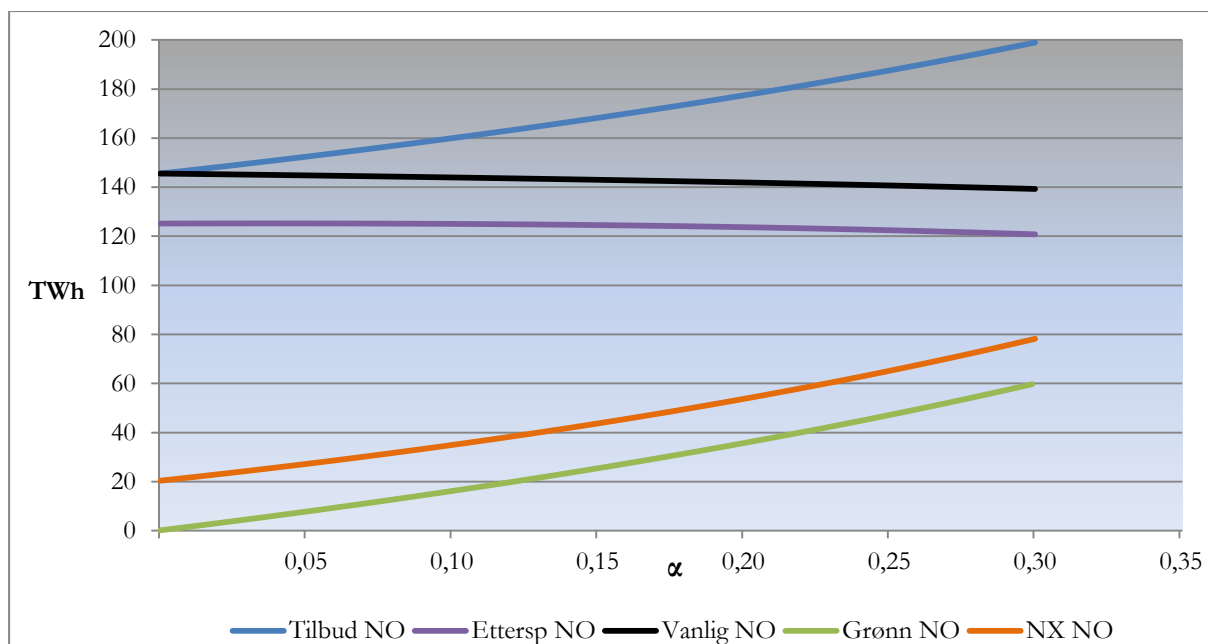
Hypotesen er at engrosprisen vil være like i de tre landene. Kraften vil til en hver tid flyte fra et lavpris- til høyprisområdet inntil alle tre områdene har lik pris. Landet med sertifikatordningen vil øke tilbudet når andelen av grønn teknologi øker, og økt tilbud fører til redusert engrospris.



**Figur 14:** Prisendring i Norge ved ubegrenset kraftoverføring

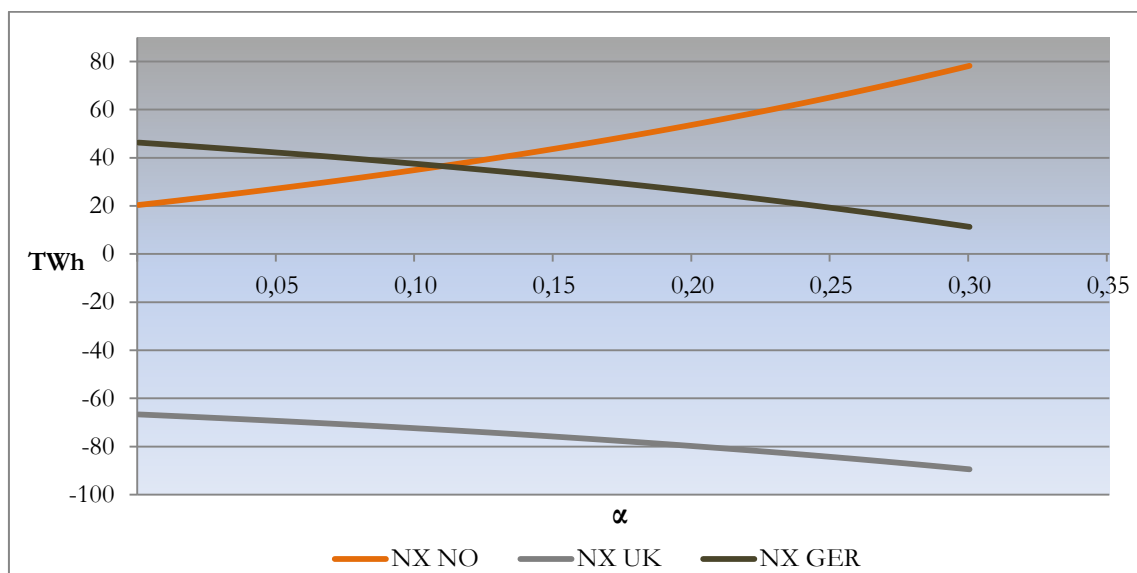
Resultatet fra simuleringen kan ikke avkrefte denne hypotesen. Engrosprisen i kraftmarkedet faller i takt med økt andelskrav  $\alpha$ . Energi- og konsumentprisen er høyere for Norge i et åpent marked enn under autarki, og konsumentprisen er flatere men har samme karakteristika som autarki tilpasningen. En relativ høy pris i utlandet, medfører den høye engros- og konsumentpris i Norge

Med de antagelsene som er gjort for pris og volum i Tyskland og Storbritannia, er prisen i disse landene høyere enn i Norge under autarki. Resultatet indikerer at Norge er nettoeksportør når overføringskapasiteten er stor, og at eksportandelen øker i takt med økt andelskrav av grønn energi. Vi kan altså si at de subsidiene vi innfører for å øke tilbudet av grønne teknologier i Norge er en direkte støtte til eksport. Det totale tilbudet av tradisjonell energi er høyere sammenlignet med autarki, men er også fallende med økt  $\alpha$ . Høyere omsattmengde av norsk kraft tilsier også at et fastsattmål for andel grønt av totaltilbud vil medføre mer grønn energi i markedet, sammenlignet med autarki.



**Figur 15:** Volumendring i Norge ved ubegrenset kraftoverføring

Både Norge og Tyskland er nettoeksportører når overføringskapasiteten er stor, mens Storbritannia importerer relativt billig kraft. Gitt modellens antagelser, er kraftflyten fra Tyskland til Storbritannia gjennom Norge. Denne avtar gradvis i takt med økt andelen grønt i simuleringen.



**Figur 16:** Endringen i nettoeksport ved ubegrenset kraftoverføring

I Norge er det antatt at det skal bygges ut 13,2 TWh/år med grønn energi. Med høy overføringskapasitet viser resultatene en nettoeksport som er større enn denne utbyggingen.

### Pris- og volumeffekter i markedet for grønne sertifikater

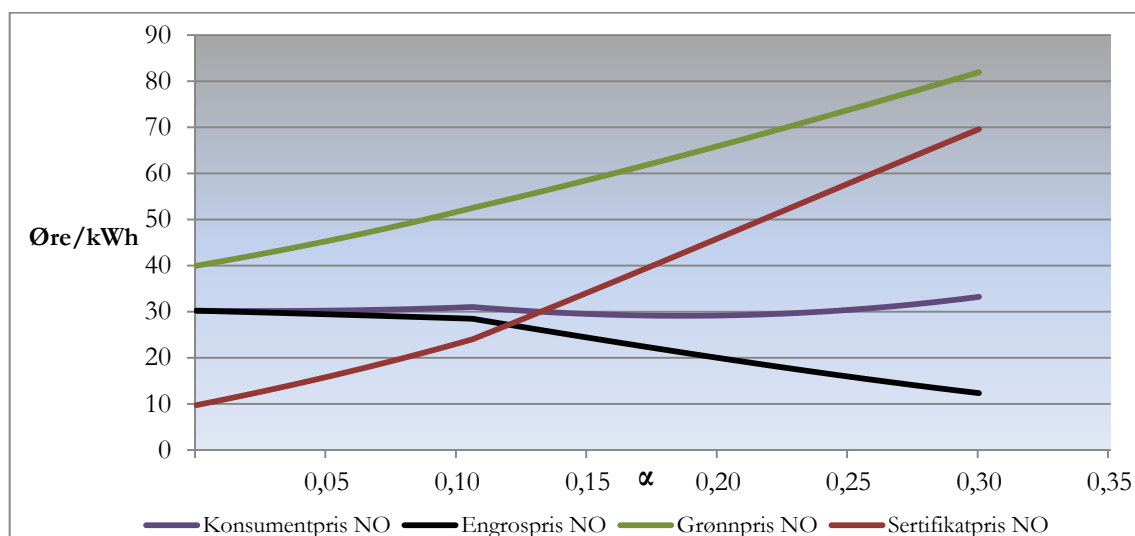
Sertifikatprisen har en konveksform og i likhet med autarki tilpasningen er den stigende. Subsidiestøtten den grønne produsenten trenger for å dekke merkostnaden er mindre enn ved forrige scenario. Dette skyldes den relative høye engrosprisen. Men en høyere engrospris, som er gitt via internasjonal handel, gir i simuleringen en høyere konsumentpris for Norge forbrukere.

### 6.3 Åpent marked med begrenset overføringskapasitet

Overføringsmengde begrenses nå til maks 12 TWh pr år, som kan overføres mellom Norge og Tyskland, og Norge og Storbritannia. De grafiske resultatene for Tyskland og Storbritannia er lagt inn i vedlegget 10.5.1.

#### Pris- og volumeffektene i kraftmarkedet

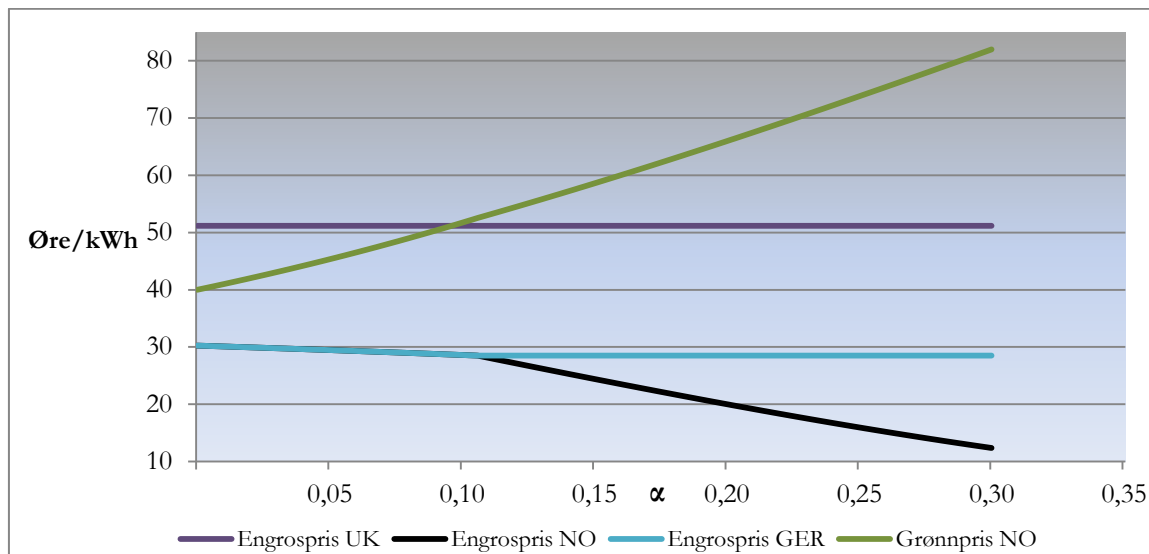
Hypotesen er at engrosprisen er den samme for alle land inntil kapasiteten er fullt utnyttet. Etter at kapasiteten er utnyttet vil prisen avhenge av innlandstilbudet og etterspørselen, og være mer lik autarkitilpasningen.



Figur 17: Prisendring i Norge ved begrenset kraftoverføring

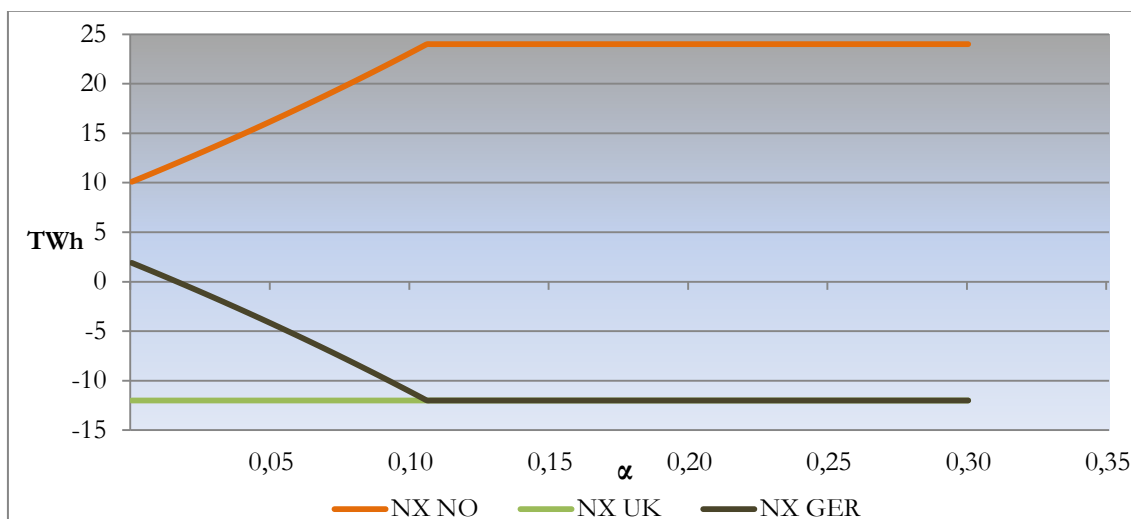
Kraftprisen i Norge og Tyskland er lik, og prisfallet fortsetter i Norge etter at overføringskapasiteten er utnyttet grunnet økt  $\alpha$ . Etter at kapasiteten er utnyttet er bevegelsen i prisene mer lik simuleringen under autarki. Resultatet kan ikke avkrefte hypotesen, og et økt tilbud av grønt medfører fallende engrospris i denne simuleringen. Simuleringsresultatet viser en kraftpris i Norge som er lavere enn ved ubegrenset overføringskapasitet, men høyere enn

autarkiprisen. Ved en andel grønt på 0,11 eksporterer Norge 12 TWh pr år til henholdsvis Storbritannia og Tyskland.



**Figur 18:** Prisendring i Norge, Storbritannia og Tyskland ved begrenset kraftoverføring

Tyskland og Norge er også her nettoeksportører før innføring av sertifikatene. Gradvis som tilbudet av kraft øker og engrosprisen faller blir kraften fra Norge relativt rimelig, og eksporteres til Tyskland. Tyskland går fra nettoeksport til -import av rimeligere kraft fra Norge. Når overføringskapasiteten er fullt utnyttet kan det ikke eksporteres mer fra Norge og engrosprisen faller raskere i Norge. Dette er konsistent med autarki analysen.



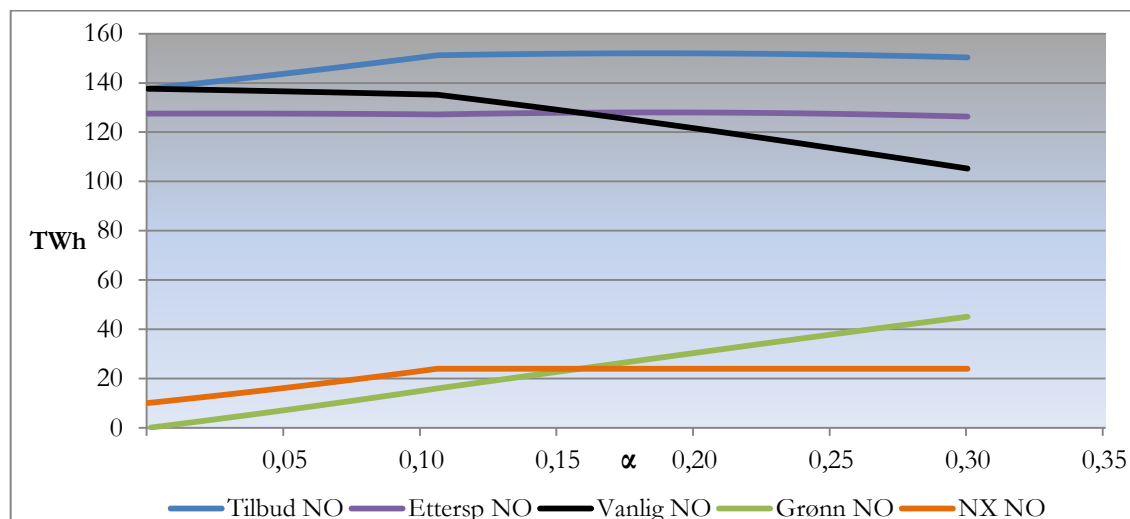
**Figur 19:** Endringen i nettoeksport ved begrenset kraftoverføring

### Pris- og volumeffekter i markedet for grønne sertifikater

Sertifikatprisen er i likhet med de tidligere simuleringene tiltakende, men grunnet et større fall i engrosprisen etter kapasitet utnyttelsen tiltar sertifikatprisen mer. Med avtakende engrospris

trengs høyere sertifikatpris for å øke andelen grønn energi, som medfører en tiltakende sertifikatpris etter makskapasitet.

Før maks kapasitet er konsumentprisens bevegelse sammenlignbar med resultatene fra ubegrenset overføringskapasitet, og etter maks kapasitet er den konsistent med resultatet fra autarki.



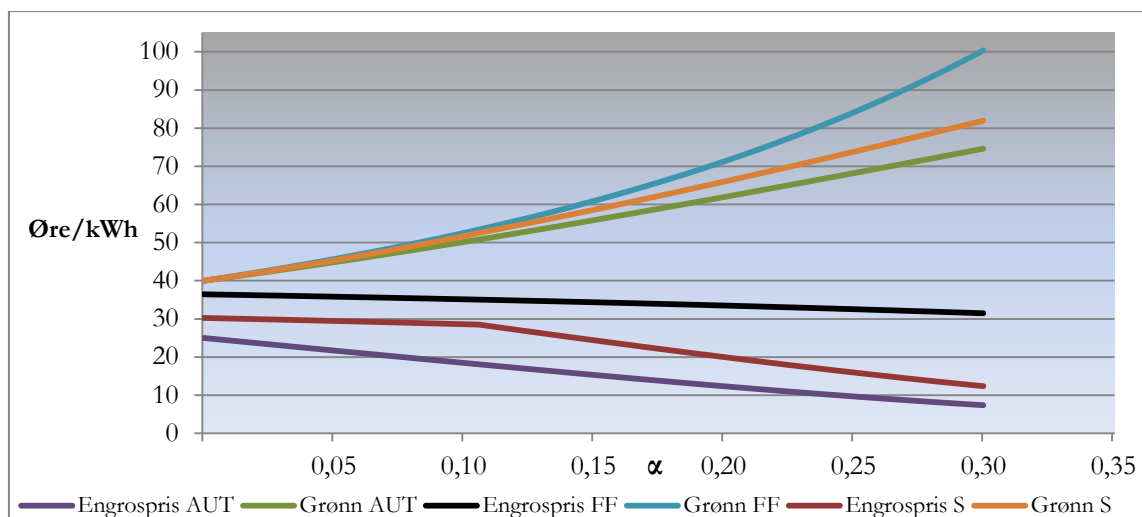
**Figur 20:** Volumendring i Norge ved begrenset kraftoverføring

#### 6.4 En sammenligning av de ulike scenariene

For en kortfattet sammenligning av effektene i Tyskland og Storbritannia, se vedlegg 10.5.1. I figurene er  $FF$  ubegrenset kapasitet av kraft overføring,  $AUT$  autarki og  $S$  begrenset overføringskapasitet.

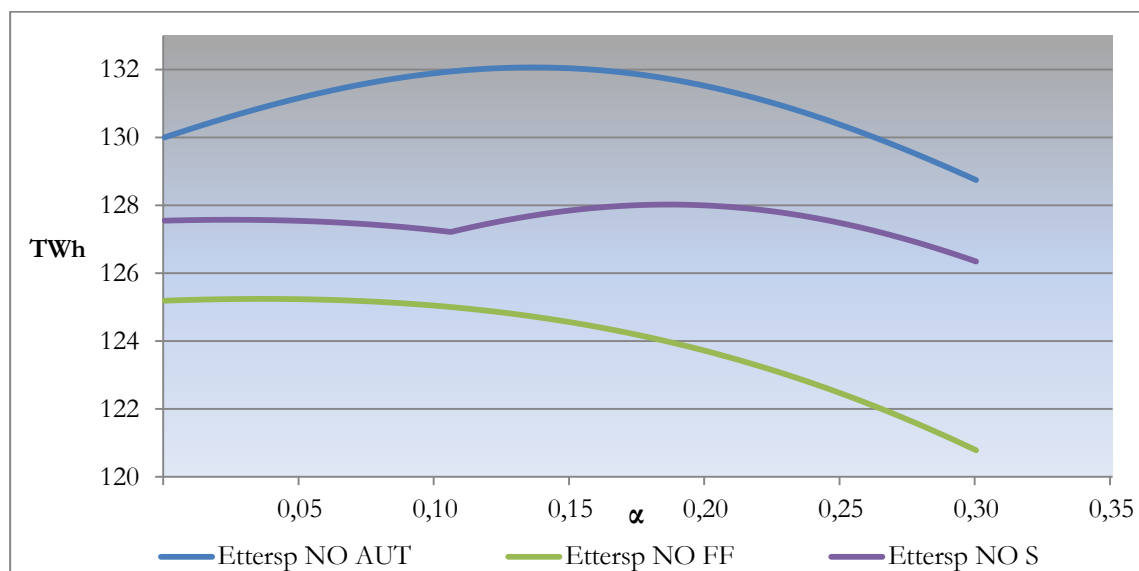
Simuleringsresultatene indikerer en høyere engrospris for Norge når prisen er gitt via internasjonal handel, sammenlignet med de andre scenariene. Krafttilbudet i Norge er også størst ved ubegrenset overføringskapasitet og det totale krafttilbudet fra tradisjonell energi avtar mindre.





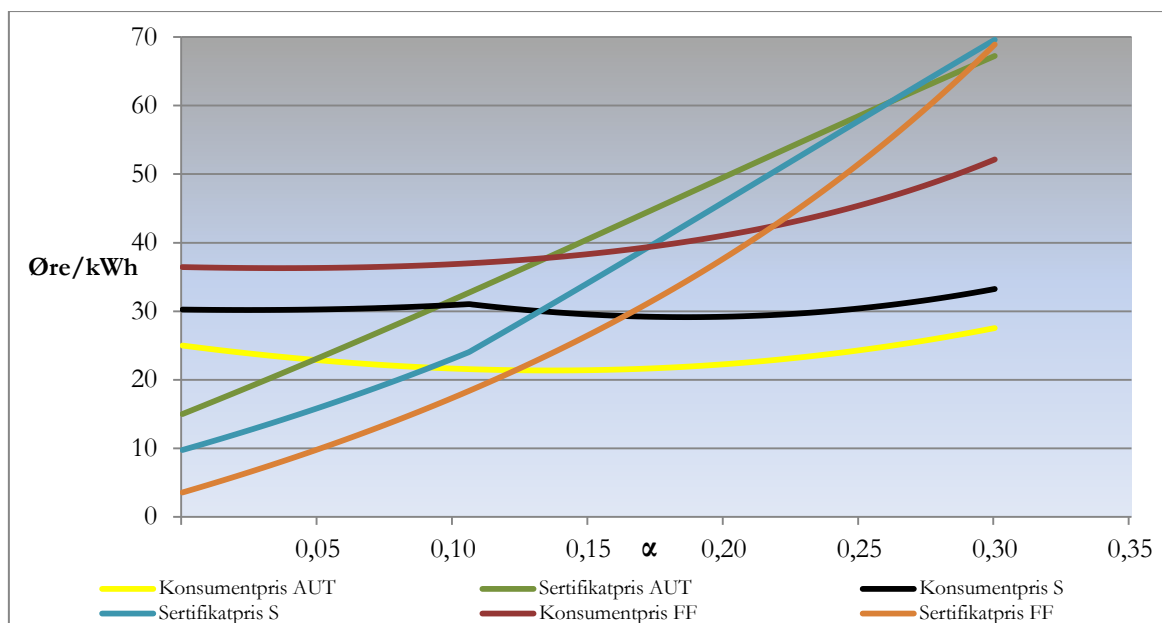
**Figur 21:** Sammenligning av prisendringene under de ulike scenarioene i Norge

Kravet om andel grønt i modellen er spesifisert som en andel av totaltilbudet. Derfor er omsatte mengde av grønn større ved ubegrenset overføringskapasitet.



**Figur 22:** Sammenligning av etterspørselen i Norge under de ulike scenarioene

Videre viser figuren at forbruket i Norge er lavere ved høyoverføringskapasitet grunnet den høye konsumentprisen, og sertifikatprisen er lavest med den relative høye engrosprisen i markedet.



**Figur 23:** Sertifikat- og konsumentprisendring under de ulike scenarioene



## 7. Sensitivitetsanalyse og videre diskusjon

### 7.1 Sensitivitetsanalyse

Den teoretiske analysen ga uklart svar på endringen i sertifikat- og konsumentprisen, og i kapitel 6 ble en simuleringen gjennomført for å kunne gi indikasjoner på mulig tilpasning gitt de ulike scenariene. En sensitivitetsanalyse er nødvendig for å teste om simuleringsresultatene er robuste. I tillegg til figurene i dette kapitlet, er flere figurer å finne i vedlegg 10.5.2.

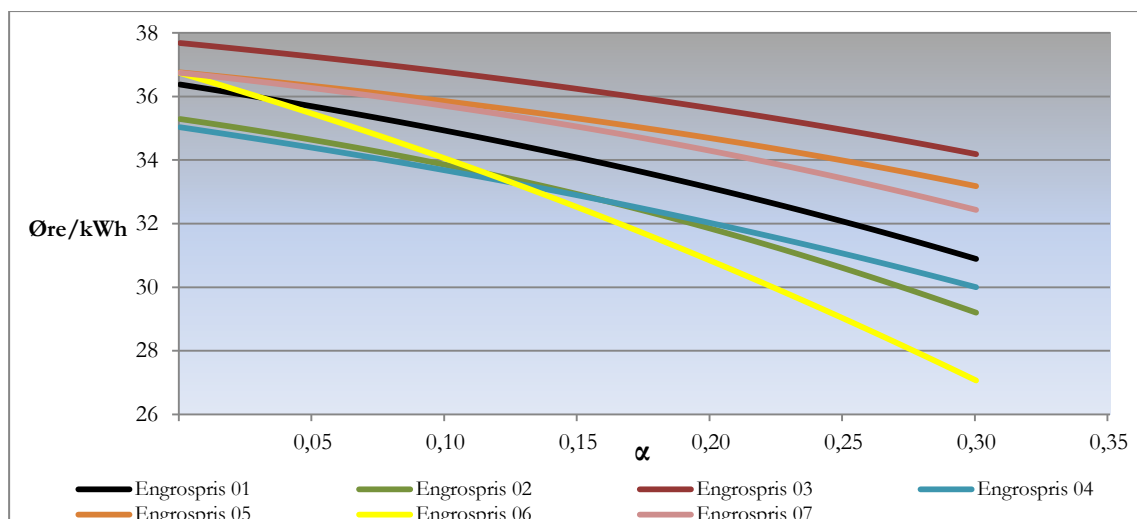
I simuleringen ble det brukt en etterspørselsselasticitet på  $-0,1$ ,  $-0,14$  og  $-0,16$  i henholdsvis Norge, Storbritannia og Tyskland, og tilbudselasticitet på  $0,3$  i alle landene. Sensitivitetsanalysen ser nærmere på hvor robuste simuleringsresultatene er ved endring i materialet som er brukt. Hovedfokuset vil være på endring i elasticiteten på tilbud- og etterspørselssiden ved ubegrenset og begrenset overføringskapasitet. Det er foretatt 7 elasticitetskombinasjoner og de er listet opp i tabell 1. Sensitivitetsanalyse i autarkitilpasning er ikke med i kapitlet, se derfor Bye (2003) for en grundig analyse ved autarkitilpasning.

**Tabell 1:** De ulike elasticitetskombinasjonene i sensitivitetsanalysen

Alternativ	Etterspørselsselasticitet			Tilbudselasticitet			
	$\epsilon_{NOR}$	$\epsilon_{GER}$	$\epsilon_{UK}$	$\tau_g$	$\tau_{NOR,e}$	$\tau_{GER,e}$	$\tau_{UK,e}$
01	-0,1	-0,1	-0,1	0,3	0,3	0,3	0,3
02	-0,4	-0,1	-0,1	0,3	0,3	0,3	0,3
03	-0,1	-0,4	-0,4	0,3	0,3	0,3	0,3
04	-0,1	-0,1	-0,1	0,1	0,6	0,3	0,3
05	-0,1	-0,1	-0,1	0,1	0,3	0,6	0,6
06	-0,1	-0,1	-0,1	0,9	0,1	0,1	0,1
07	-0,3	-0,3	-0,3	0,3	0,3	0,3	0,3

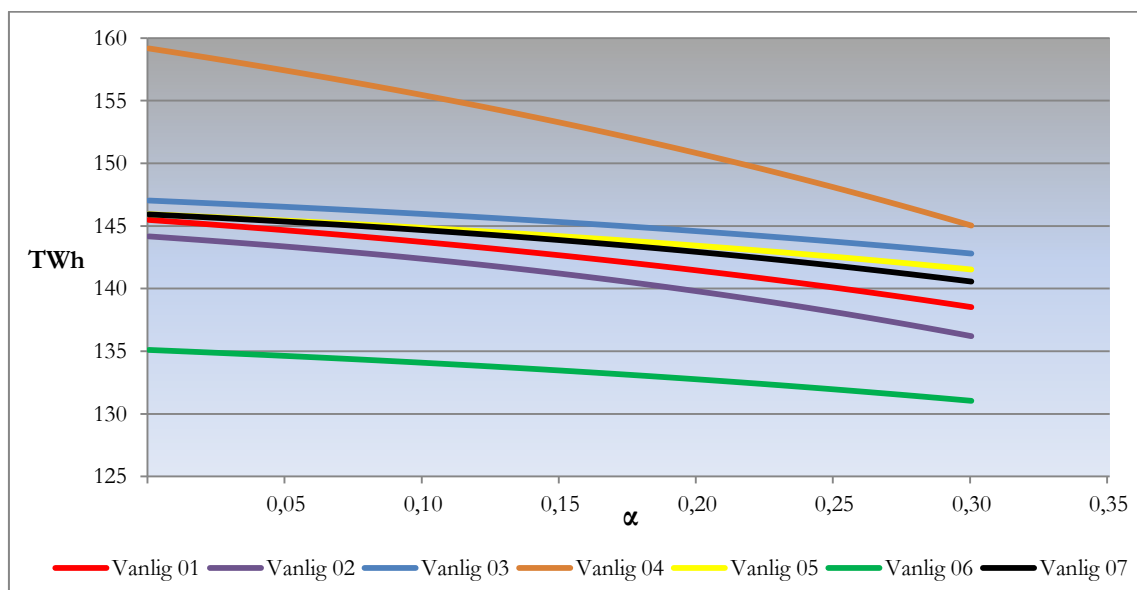
#### 7.1.1 Sensitivitetsanalyse av pris- og volumeffekter ved ubegrenset flyt

Gjennom den teoretiske analysen og simuleringen viser resultatene at kraftprisen og volumet i Norge avtar. Energibilbudet av tradisjonell avtar, mens grønn energi tiltar med økt krav. Endringen i etterspørselen etter kraft i Norge er vist i figur 22, og er konkav grunnet økt konsumentpris i takt med økt andel grønt. Hypotesen om avtagende kraftpris og volum i kraftsektoren i Norge avkrefte ikke av sensitivitetsanalysen. Dette er illustrert i figur 24 med fallende engrospris ved ubegrenset kraftoverføring, og i figur 25 med avtagende tilbud av tradisjonell energi i Norge. Nettoeksporten fra Norge øker i takt med økt andel grønt, og forbrukerne som betaler for subsidien i Norge etterspør mindre energi (se vedlegg 10.5.1).



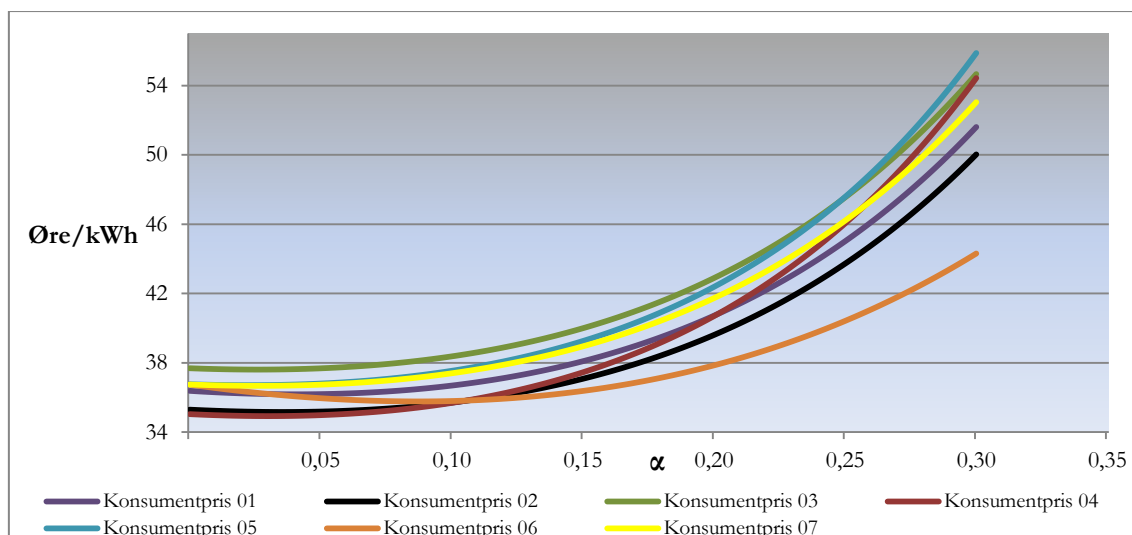
**Figur 24:** Kraftprisen med ulike elastisitetskombinasjoner, ved ubegrenset kraftoverføring

Tilbudet av tradisjonell energi i Norge avtar mindre ved en høy tilbudselasticitet fra grønn energi og en høy etterspørselselasticitet fra utlandet. Dette er i tråd med prissensitivitet ved tilbud og etterspørsel.



**Figur 25:** Tilbudet av vanlig energi avtar i Norge med de ulike kombinasjonene, ved ubegrenset kraftoverføring

Med ubegrenset overføringskapasitet får Norge den høyeste kraftprisen, sammenlignet med de andre tilpasningene. Simuleringsresultatet viser at en høyere kraftpris fører til lavere sertifikatpris, men høyere konsumpris. Forbrukerne i Norge betaler derfor mer for energien ved ubegrenset overførings mulighet. Dette bekreftes i sensitivitetsanalysen. Konsumentprisens karakteristika i sensitivitetsanalysen er lik med simuleringsresultatene ved alle de ulike elastisitetskombinasjonene.

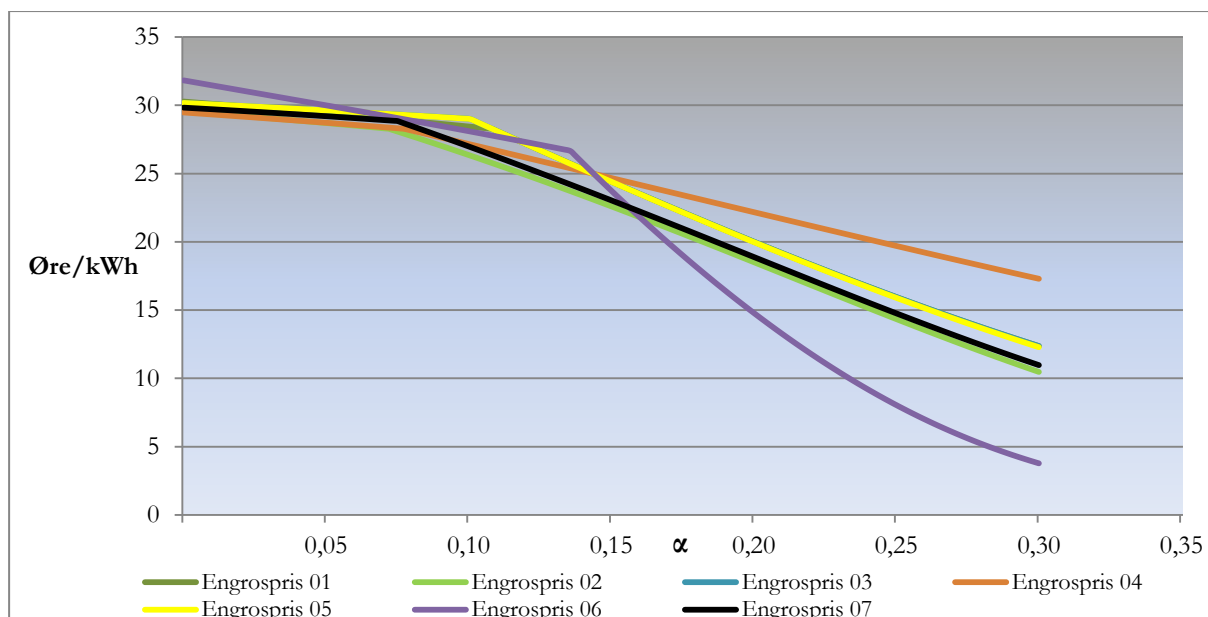


**Figur 26:** Konsumentprisen med ulike elastisitetskombinasjoner ved ubegrenset kraftoverføring

Elastisitetskombinasjon 06 med høy tilbudselasticitet av grønn energi, har den laveste tiltakende kurven for konsumentpris, mens konsumprisen tiltar mer når tilbudselasticiteten er høy for tradisjonell energi (nr. 04). I figur 25 har 04 sterkere avtakende tilbud av tradisjonell og dermed sterkere tiltakende konsumpris, og det motsatte for 06.

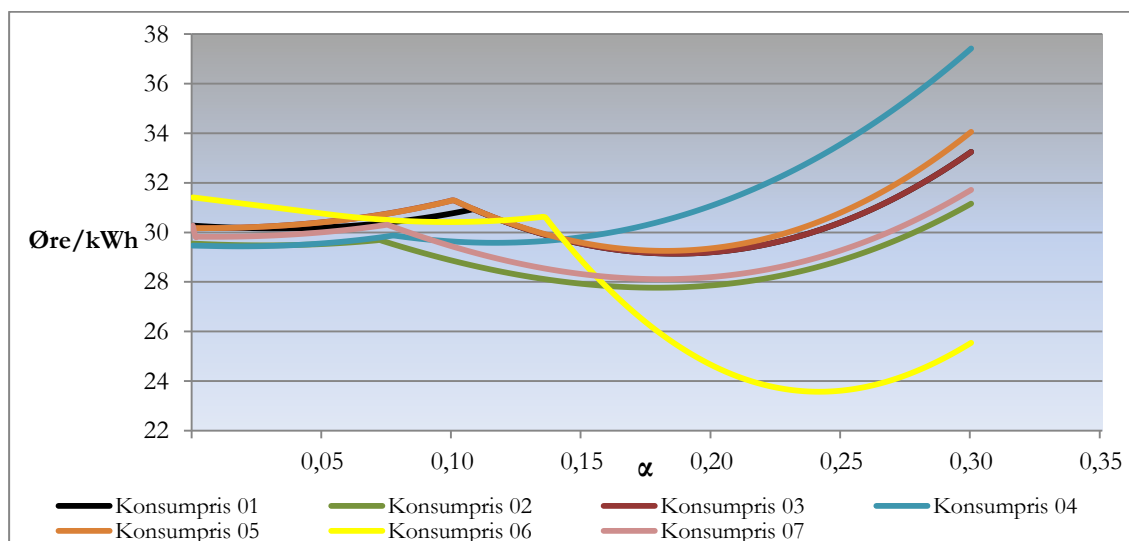
### 7.1.2 Sensitivitetsanalyse av pris- og volumeffekter ved begrenset kapasitet

Sensitivitetsanalysen kan ikke avkrefte hypotesen og funnene i simuleringsresultatene. Kraftprisen er avtagende og prisfallet tiltar mer i Norge etter at kapasiteten på kablene er utnyttet. Kombinasjon 06 med høyt tilbudselasticitet av grønn energi, får det største prisfallet. På lik linje med ubegrenset kapasitet fører dette til en konsumentpris som avtar mer enn de andre. Også i denne analysen er det kombinasjon 04 som har sterkere tiltakende konsumpris grunnet engrosprisen som avtar mindre.



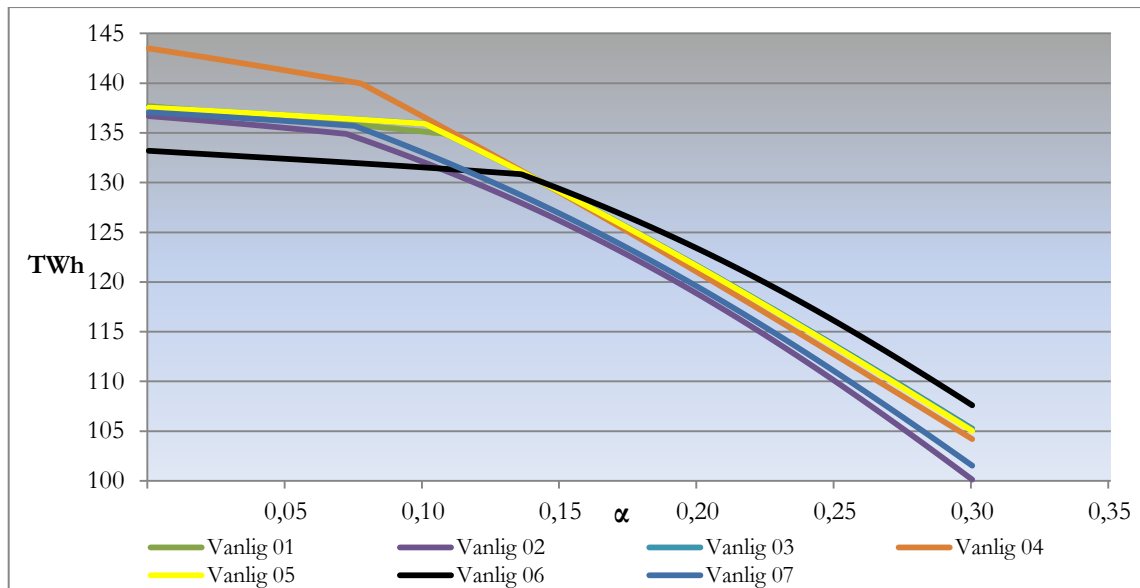
**Figur 27:** Kraftprisen med de ulike elastisitetskombinasjonene i Norge, ved begrenset kraftoverføring

I figur 27 og 28, som illustrerer markedet ved begrenset overføringskapasitet, ser vi en tydelig knekk i kurven når kapasiteten er utnyttet. Kombinasjon 06 har den høyeste andelen grønn energi før kapasiteten er utnyttet på kablene grunnet høyere tilbudselasticitet av grønn energi.



**Figur 28:** Konsumentprisen i Norge med ulike elastisitetskombinasjonene, ved begrenset kraftoverføring

Konsumentprisen viser samme tendenser som funnene fra sensitivitetsanalysen, for ubegrenset kapasitet. Det er kombinasjon 06, med høyest energiprisfall, som gir lavest konsumpris i Norge. Knekken på kurven kommer relativt seint grunnet den store mengden grønn energi som produseres før kapasiteten er møtt. Konsumentprisen faller mest etter denne kapasiteten før minimumspunktet like før 0,25. Tilbudet av tradisjonell energi og etterspørselen i Norge er fallende med økt andel grønn energi.



**Figur 29:** Fallende tilbud av vanlig energi med de ulike elastisitetskombinasjonene, ved begrenset kraftoverføring

## 7.2 Diskusjon rundt hypotesen og resultatene

Hypotesen om redusert lønnsomhet for produsenten av tradisjonell energi, og redusert omsatt kvantum i Norge ved innføring av grønne sertifikater, er et robust resultat under alle de tre scenariene. Med ubegrenset overføringskapasitet avtar tilbudet av tradisjonell kraft fra Norge i et roligere tempo enn ved de to andre scenarioene, og mengden grønn energi er større enn ved autarki. Med handelsmuligheter viser resultatene at det økte tilbudet av grønt blir stadig mer omsatt i Storbritannia og Tyskland, og gir høyere forbruk i disse landene enn ved de to andre scenarioene. Resultatene er følsom for elastisitetsverdiene på tilbud og etterspørsel. Høy tilbudselasticitet av grønn energi gir høyere andel grønt før evt. kapasiteten for overføring er møtt. Lav elasticitet for forbrukerne i Norge gir mindre avtagende etterspørsel når andelen grønt øker, mens høyere elasticitet fra forbrukerne i utlandet gir mer eksport for Norge.

Gitt det økte tilbudet av grønn kraft til land som Storbritannia og Tyskland, tilsier ikke dette alene at mengden tradisjonell (fossil) produksjon i Europa vil avta ved økt overføringsmulighet. Det er gjort antagelse om at Tyskland og Storbritannia primært bruker fossile energikilder i deres kraftproduksjon. Innenfor modellens rammer, vil økt overføringskapasitet redusere energiprisen i Storbritannia, men øke relativt i Tyskland. Høy overføringskapasitet kan derfor bidra til redusert kraft produksjon i Storbritannia, men økt i Tyskland. Om den totalproduksjonen av sort energi øker eller reduseres er usikkert. Oppgaven ignorerer effekter på markedene for sorte sertifikater (ETS) og hvite sertifikater



(energisparing)<sup>18</sup> som kan inntreffe. En utvidelse ved å inkludere disse ordningene ville vært en interessant forlengelse. Med flere ordninger vil det nok være vanskeligere å måle den faktiske effekt, slik det ble diskutert i kapitel 2.1.1.

Pris- og volumeffekter i det grønne sertifikatmarkedet og for forbrukerne er også følsomme for elastisitetsverdiene på tilbud- og etterspørselssiden. Konsumentene i Norge vil også få en høyere pris ved ubegrenset overføringskapasitet grunnet høyere kraftpris på handel.

Selv om pris- og volumeffekten er sensitiv for elastisitetsverdiene, holder den generelle konklusjonene fra simuleringen. Energiprisen og tilbudet av vanlig energi faller i kraftmarkedet i alle tilfellene i Norge. Etterspørselen i Norge samt konsumentprisen kan både avta og tilta og avhenger av andelen grønt som fastsettes i sertifikatmarkedet. Nettoeksport fra Norge øker i takt med økt andel grønt inntil en evt. maksgrense på overføringen er møtt.

### 7.3 Forutsetninger og videre diskusjon

Resultatene i både teori- og analysedelen er påvirket av forenklinger som er gjennomført i oppgaven. En diskusjon rundt disse er derfor nødvendig for å kunne belyse eventuelle avvik som kan oppstå med andre empiriske analyser.

Antagelsen om årlige verdier i simuleringen har betydning for resultatene. Prisen og forbruket gjennom året vil svinge mellom kalde og varme årstider, og fra en time til en annen. Ser en på kraftoverføring kan derfor kablene ha en svært høy utnyttelse i hver time, men ha en nettoflyt i løpet av et år som er betydelig mindre. Tidsoppløsningen på ett år vil derfor dekke over kortsiktige effekter som oppstår i markedet. En kabel på 1400 MW kan årlig gi en nettoflyt som er lavere enn den maksimale kapasiteten, men ha flaskehalser i enkelte timer når forbruk/tilbud skifter.

Det er også viktig å understreke at et land som Norge er koblet mot flere land enn bare Tyskland og Storbritannia når sjøkablene er satt i drift. Dynamikken som skjer mellom de ulike landene er utelatt i modellen, og er en vesentlig antagelse for analysen. Bl.a. viser resultatene at det økte tilbudet i Norge ved høy overføringskapasitet medfører at kraftprisen i Tyskland og Storbritannia faller. Økt tilbud i Norge vil i normalttilfellet ha begrenset effekt på prisen i de europeiskelandene, siden markedet i Europa er mye større<sup>19</sup>. Siden modellen kun

---

<sup>18</sup> Se «Grønne og hvite sertifikater iblandet sort» av Bye og Amundsen (2012) for effekten av et marked med alle de tre sertifikatordningene.

<sup>19</sup> I henhold til teori som ble presentert i kapitel 3.2

tar for seg to store land, og ingen flyt muligheter til de andre integrerte europeiskelandene, viser resultatene at økt tilbud medfører prisfall i alle de tre landene. Ser en Europa som et fullt integrertmarked med rundt 3000 TWh produksjon pr år vil ikke dette nødvendigvis være tilfellet, og derfor kan resultatene avvike fra virkeligheten. En begrenset effekt av norsk produksjon på kraftprisen i Europa, kan gi en tiltakende konsumpris i Norge ved økt andel grønt. Siden effekten på kraftprisen er minimal, vil muligens produksjonsmengden av tradisjonell energi i Norge også endre seg minimalt. Gitt denne antagelsen vil grønn energi nå i større grad komme i tillegg til den tradisjonelle energien i det europeiske kraftmarkedet, enn i stedet for.

Siden oppgaven ikke har gjort analyser av et mye større og tettintegrert utland, er det usikkert hva energipris- og volumeffektene vil bli ved økt norsk produksjon. Det eneste som virker sikkert er at innlandskonsummentene vil betale mer for kraften sammenlignet med forbrukerne i utlandet grunnet subsidiekravet, og mer eksporteres fra innlandet til utlandet.

En annen sentral antagelse er ett anmeldingsområde i hvert av landene. For eksempel i Norge er det pr i dag 5 soner som kan gi 5 ulike priser(Statnett 2015). Det er derfor ikke gitt at disse landene vil ha én pris for hele landet slik det kommer frem i resultatet, men kan ha ulike prisområder innad i hvert av landene.

Modellen ser også vekk fra grønne, hvite og sorte sertifikater i Tyskland og Storbritannia. EU har som kjent klimamålet for 2020 og 2030, som Tyskland og Storbritannia er en del av og som påvirker Norge i stor grad. Dette vil medføre at andre ordninger kan påvirke dynamikken som skjer mellom disse tre landene. Økt kraftforbruk i Europa grunnet høyere eksport av grønn energi fra Norge vil gi ringvirkninger på tilstedeværende ordninger i disse landene. Videre finnes det også flere støtteordninger i Norge som bl.a. ENOVA som det ikke er tatt hensyn til i modellen.

Under antagelsen om rasjonelle aktører er all utbygging av grønn energi, som er konkurransedyktig, gjennomført før sertifikatordningen innføres. Men skulle det være uoppdagede bygge muligheter som har en lavere kostnad, kan dette medføre lavere sertifikatpriser enn simulert i modellen. Slik sertifikatprisen er definert kan den derfor være null eller mindre enn verdiene som er lagt til grunn i analysen. Modellen er også statisk, og dynamikken for tilpasning er utelukket.

Hvis en ser på lengre sikt kan kostnadsstrukturen endre seg gjennom innovasjon og læring. Dette kan medføre lavere kostnader for produsenten av grønn energi på lang sikt, som den

statiske modellen ikke tar hensyn til. Lavere kostnad ville videre gitt lavere sertifikatpriser for konsumentene.

## 8. Konklusjon

Hensikten med denne oppgaven er å se nærmere på pris- og volumeffektene ved innføring av grønne sertifikater i en åpen økonomi, ved handel med to store land. Et sentralt arbeid som oppgaven er basert på er Torstein Bye sine analyser av grønne sertifikater under autarki (Bye 2003).

I innledningen ble problemstillingen lagt frem;

*“Hvordan endres tilpasningen i et kraftmarked med grønne sertifikater, når markedet åpnes for fri handel med to andre store land? Hvordan endres tilpasningen fra ubegrenset til begrenset overføring for landet med sertifikatordningen? Hvilke pris- og volumeffekter vil oppstå i innlandsmarkedet og sertifikatmarkedet?”.*

Videre ble følgende hypotese lagt frem for de tre ulike scenarioene;

*Under autarki vil sertifikatplikten for forbrukerne isolert sett bidra til redusert etterspørsel etter elektrisitet. Subsidieffekten gjør grønn energi mer lønnsomt og fører til økt tilbud av grønn produksjon. Det økte tilbudet av grønt fører til redusert kraftpris, og dermed redusert lønnsomhet og kvantum av vanlig energi produksjon. Prisen for konsumentene er usikker, og vil avhenge av avgifts- og subsidieffekten. Både kraftpris og volum vil avta i et autarki.*

*Når markedet åpner for ubegrenset overføring av kraft, vil kraftprisen være den samme i alle tre land. Markedet med sertifikatordningen vil øke tilbudet av kraft i takt med økt andel grønt. Det økte tilbudet fører til redusert kraftpriser og mer av kraften vil flyte over fra landet med sertifikatordningen til de to andre landene. Tilbudet av vanlig energi vil avta med fallende kraftpris på lik linje med autarki.*

*Ved begrenset overføringskapasitet vil prisene være like i alle tre land frem til kapasiteten er fullt utnyttet. Deretter vil landet med sertifikatordningen tilpasse seg slik det gjorde under et autarki, og pris og volum vil avta i landet med sertifikatordningen. Prisendringen og forbruket for innlandskonsumentene er usikker ved ubegrenset og begrenset kraftflyt, og vil avhenge av avgifts- og subsidieffekten.*

For å analysere pris- og volumeffektene ble en modell konstruert og analysert. Den teoretiske analysen ga ikke konkret resultatet for konsument- og sertifikatprisen, og en simulering ble gjennomført med antagelse om autarki, ubegrenset overføringskapasitet og begrenset overføringskapasitet. Deretter ble en sensitivitetstest gjennomført grunnet usikkerhet rundt datagrunnlaget i analysen.

Det er imidlertid knyttet mulige svakheter med datamaterialet som er brukt for de fremskrevne verdiene, og det gjøres flere antagelser og forenklinger i analysen. Dette kan medføre avvik fra andre analyser og er diskutert i henholdsvis kapittel 5 og 7.

Men gitt de antagelsene som her ligger til grunn, og selv om effektene er følsomme for tilbud- og etterspørselsetelastisitetene, finner vi at krav om økt andel grønn energi gjennom grønne sertifikater øker krafttilbudet i markedet. Dette fører til at kraftprisen faller og videre redusert tilbud av vanlig energi i innlandsmarkedet, både under autarki og begrenset overføringskapasitet. Hvor vidt den totale omsatte mengden av energi øker eller faller avhenger av andelen grønt som bestemmes.

Ved ubegrenset overføring vil effekten avhenge av hvor stort utlandet er. Ved et mindre utland vil økt tilbud fra innlandet påvirke kraftprisen sterkere, og kraftprisen samt det totale tilbudet av vanlig energi faller. Dersom utlandet er svært stort i forhold, er det usikkert hva som vil skje med prisseffekten ved økt tilbud fra innlandet. I henhold til teori vil effekten av økt tilbud fra innlandet være minimal på kraftprisen. Men det som er felles for både et stort og et lite utland ved ubegrenset overføringskapasitet, er at kraftproduksjon i innlandet i større grad blir eksport ved økt krav av grønn energi.

Etter et bestemt andelskrav vil konsumentprisen stige for de sertifikatpliktige, og innlandsforbruket faller som følge av økt konsumpris. Ved mulighet for handel vil mer av kraften eksporteres til utlandet, som betaler relativt mindre for energien i forhold til innlandsforbrukerne. Høyere kapasitet på overføringsmulighetene gir mer eksportert kraft fra det sertifikatpliktige landet. Resultatene tilsier derfor at de subsidiene vi innfører for å øke tilbudet av grønne teknologier i hjemlandet dermed er en direkte støtte til eksport.

## 9. Referanseliste

- AG, P. (2014). Letztverbrauch 2019 Planungsprämissen für die Berechnung der EEG-Umlage. I: Krampe, L. & Peter, F. (red.). Berlin: Prognose AG. 41 s.
- Bendiksen, K. (2014). Det norske energisystemet mot 2030. *UIO Energi*. Oslo: UIO.
- Bhattacharyya, S. C. (2011). *Energy economics: concepts, issues, markets and governance*: Springer Science & Business Media.
- Bye, T. (2003). On the Price and Volume Effects from Green Certificates in the Energy Market. *Statistics Norway, Research Department* (351).
- Bye, T. & Aune, F. R. (2005). Elektrisitetsetterspørsel framover. *Økonomiske analyser, SSB*, 2005/4: 11 s.
- Bye, T. & Bruvoll, A. (2008). Multiple instruments to change energy behaviour: the emperor's new clothes? *Statistics Norway, Research Department*, 549: 22.
- Bye, T. & Hansen, V. (2008). How do Spot prices affect aggregate electricity demand? *Statistics Norway, Research Department*, 527: 82.
- Bye, T. (2009). Det perfekte sertifikatet. *Samfunnsøkonomen* (9/2009).
- Bye, T. & Hoel, M. (2009). Grønne sertifikater – dyr og formålsløs fornybar moro. *Samfunnsøkonomen* (7/2009).
- Bye, T. & Amundsen, E. S. (2012). Grønne og hvite sertifikater iblandet sort. *Økonomiske analyser, SSB*, 3/2012.
- Bøeng, A. C. (2010). Konsekvenser for Norge av EUs fornybardirektiv. *Økonomiske analyser, SSB*, 4/2010.
- Bøhnsdalen, E., Kringstad, A. & Christiansen, L. (2013). Kabler til Tyskland og Storbritannia – analyse av samf.øk. nytte ved spothandel. *Analysereport*. Oslo: Statnett. 102 s.
- Böhringer, C. & Rosendahl, K. E. (2009). Green Serves the Dirtiest - On the Interaction between Black and Green Quotas. *Statistics Norway, Research Department* (581).
- Energidepartementet, O.-o. (2014). *Konsesjon til strømkabler til Tyskland og Storbritannia*. <https://www.regjeringen.no/>: Olje- og Energidepartementet. Tilgjengelig fra: <https://www.regjeringen.no/nb/aktuelt/Konsesjon-til-stromkabler-til-Tyskland-og-Storbritannia/id2008232/> (lest 23/2).
- Erichsen, G., Hegg, U. & Schweiker, M. (2014). *EUs klima- og energimål for 2030 vedtatt*. regjeringen.no: Utenriksdepartementet. Tilgjengelig fra: <https://www.regjeringen.no/nb/aktuelt/EUs-klima--og-energimål-for-2030-vedtatt/id2009038/> (lest 16/2/2015).

- EU. (2009). *Renewable Energy Directive (2009/28/EC)*. I: EU (red.): EU. Tilgjengelig fra: <http://ec.europa.eu/energy/en/topics/renewable-energy/renewable-energy-directive> (lest 16. Februar).
- Førsund, F. R. (2007). *Hydropower Economics*. I. New York: Springer US.
- Gardner, P. (2011). *UK Generation and Demand Scenarios for 2030*. I: Williams, D. (red.). Glasgow.
- Gommessen, H., Söderlund, E., Willumsen, M. Ø. & Nora, M. (2013). *Nordic Market report 2013*. Oslo: NordREG. 42 s.
- IEA. (2014a). *Key World Energy STATISTICS*. I: Agency, I. E. (red.). Paris, France: International Energy Agency.
- IEA. (2014b). *World Energy Outlook 2014*. Paris, France: International Energy Agency.
- Jansrud, J. (2014). *Svenskene vil utvide til 2030*. Gudbrandsdal Energi: Gudbrandsdal Energi. Tilgjengelig fra: <https://www.ge.no/blogg/svenskene-vil-utvide-til-2030/> (lest 16/2/2015).
- Johnsen, T. A. (2001). Demand, Generation and Price in the Norwegian Market for Electric Power. *Energy Economics*, 23: 227-251.
- Lont, A. & Borgen, H. (2013). Søknad om konsesjon for tilrettelegging av kraftutveksling med Tyskland og Storbritannia: Statnett. 101 s.
- Lundberg, J. & Eliston, A. J. (2014). *Et norsk-svensk elsertifikatmarked, Årsrapport 2013*, 1501-2832: Norges vassdrags- og energidirektorat(NVE). 44 s.
- Madlener, R., Bernstein, R. & González, M. Á. A. (2011). *Econometric Estimation of Energy Demand Elasticities*. Mathieustraße, Tyskland: E.ON Energy Research Center, RWTH Aachen University.
- NVE. (2014). *Kraftsituasjonen, 4. kvartal 2014*. I: energidirektorat, N. v.-o. (red.). *Kvartalsrapport*: NVE.
- NVE. (2015). *Kostnader i energisektoren*. I: Weir, D. E. (red.). Oslo: Norges vassdrags- og energidirektorat. 238 s.
- OED. (2003). *Planlagt kabel mellom Norge og England*. <https://www.regjeringen.no/>: Olje- og Energidepartementet. Tilgjengelig fra: [https://www.regjeringen.no/nb/aktuelt/planlagt\\_kabel\\_mellom\\_norge\\_og/id250381/](https://www.regjeringen.no/nb/aktuelt/planlagt_kabel_mellom_norge_og/id250381/) (lest 23.2).
- OED. (2015). *Enighet om endringer i elsertifikatavtalen*. <https://www.regjeringen.no/>: Olje- og Energidepartementet. Tilgjengelig fra:

- <https://www.regjeringen.no/nb/aktuelt/enighet-om-endringer-i-elsertifikatavtalen/id2400205/> (lest 19.3).
- Statista. (2015). *Total demand for electricity in the United Kingdom (UK) from 2000 to 2013 (in GWh)* <http://www.statista.com>: Statista. Tilgjengelig fra: <http://www.statista.com/statistics/323381/total-demand-for-electricity-in-the-united-kingdom-uk/> (lest 24/3).
- Statnett. (2015). *Nettutviklingsplan 2015. I: Statnett (red.): Statnett. 57 s.*
- Strøm, S. & Vislie, J. (2007). *Effektivitet, fordeling og økonomiske politikk*. Oslo: Universitetsforl. 313 s.
- Sydsæter, K. & Hammond, P. J. (2008). *Essential mathematics for economic analysis*. Harlow: Prentice Hall. XIV, 721 s. : ill. s.
- Sættem, J. B. (2014). *Nye kabler til utlandet gir dyrere strøm*. Oslo: NRK. Tilgjengelig fra: <http://www.nrk.no/norge/-utenlandskabler-gir-dyrere-strom-1.11982866> (lest 23/2).
- UK, E. (2015). *Electricity generation* <http://www.energy-uk.org.uk/>: Energy UK. Tilgjengelig fra: <http://www.energy-uk.org.uk/energy-industry/electricity-generation.html> (lest 23.3).
- Vasagar, J. (2015). *Renewables take top spot in Germany power supply stakes*. Financial Times. <http://www.ft.com>: Financial Times. Tilgjengelig fra: <http://www.ft.com/cms/s/0/cc90455a-9654-11e4-a40b-00144feabdc0.html#axzz3VCyNsbwv> (lest 23.3).
- Viggen, K. (2014). *LO-topper strides om kraftkabler*. <http://frifagbevegelse.no>: Fri Fagbevegelse. Tilgjengelig fra: [http://frifagbevegelse.no/politikk/forbundstopper-strides-om-kraftkabler-til-europa\\_294342.html](http://frifagbevegelse.no/politikk/forbundstopper-strides-om-kraftkabler-til-europa_294342.html) (lest 23/2).
- Wolfram, C. D. (1999). *Measuring Duopoly Power in the British Electricity Spot Market*. *American Economic Review*, 89 (4): 805-826.





## 10. Vedlegg

### 10.1 Optimal tilpasning av vannkraftprodusent

Modellen som presenteres er hentet fra Førsund(2007). Under vannkraftproduksjon er de marginalkostnadene null på kortsikt, det koster ikke å operere kraftverket. Dermed vil en sosial optimaltilpasning være når en har maksimert arealet under etterspørselskurven fra forbrukerne

$$\sum_{t=1}^T \int_{z=0}^{e_t^H} p_t(z) dz \quad (24)$$

Hvor  $e_t^H$  er vannkraft produsert i periode  $t = 1, \dots, T$ , og  $p_t$  er prisen. Det antas at det ikke er noen eksterne kostnader involvert i produksjon eller konsum av vannkraft. Videre i modellen innføres det en betingelse for muligheten til å lagre vannet, altså reservoar på størrelsen  $\bar{R}$

$$R_t \leq R_{t-1} + w_t - e_t^H \quad (25)$$

Vannlagret i perioden  $R_t$ , består av mengden som er lagret fra tidligere periode  $R_{t-1}$ , vannmengden som kommer inn i nåværende periode  $w_t$ , og mengden energi som produseres i perioden  $e_t^H$ . Lageret har en øvre kapasitet slik at  $\bar{R} \geq R_t$ .

$$x_t = e_t^H - e_t^{XI} \quad (26)$$

(26) viser landets energibalanse som involverer import når  $e_t^{XI} < 0$ , og eksport når  $e_t^{XI} > 0$ . Den totale mengden med kraft i markedet i perioden er  $x_t$ . Kablene har begrenset kapasitet slik at en betingelse for øvre (eksport) og nedre (import) kapasitetsgrense innføres  $-\bar{e}_t^{XI} \leq e_t^{XI} \leq \bar{e}_t^{XI}$ . Prisen i utlandet er  $p_t^{XI}$ . Det sosiale optimaliseringsproblemet, som den sosiale planleggeren bestemmer, blir da:

$$\max \sum_{t=1}^T \int_{z=0}^{x_t=e_t^H-e_t^{XI}} p_t(z) dz + p_t^{XI} e_t^{XI}$$

Med hensyn til (24) – (26), hvor  $x_t, e_t^H, R_t \geq 0$ ,  $T, \bar{R}, \bar{e}^{XI}, p_t^{XI}$  er gitt,  $t = 1, \dots, T$ .

Optimaliseringsproblemet kan nå løses som en Kuhn – Tucker betingelse, slik at Lagrangs funksjonen for problemet blir:

$$\mathcal{L} = \sum_{t=1}^T \left( \int_{z=0}^{e_t^H-e_t^{XI}} p_t(z) dz + p_t^{XI} e_t^{XI} \right)$$

(27)

$$\begin{aligned}
& - \sum_{t=1}^T \lambda_t (R_t - R_{t-1} - w_t + e_t^H) \\
& - \sum_{t=1}^T \gamma_t (R_t - \bar{R}) \\
& - \sum_{t=1}^T \alpha_t (e_t^{XI} - \bar{e}^{XI}) \\
& - \sum_{t=1}^T \beta_t (-e_t^{XI} - \bar{e}^{XI})
\end{aligned}$$

Første ordensbetingelsene blir da

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial e_t^H} = p_t(e_t^H - e_t^{XI}) - \lambda_t \leq 0 \quad (= 0 \text{ når } e_t^H > 0)$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial e_t^{XI}} = -p_t(e_t^H - e_t^{XI}) + p_t^{XI} - \alpha_t + \beta_t = 0$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial R_t} = -\lambda_t + \lambda_{t+1} - \gamma_t \leq 0 \quad (= 0 \text{ når } R_t > 0)$$

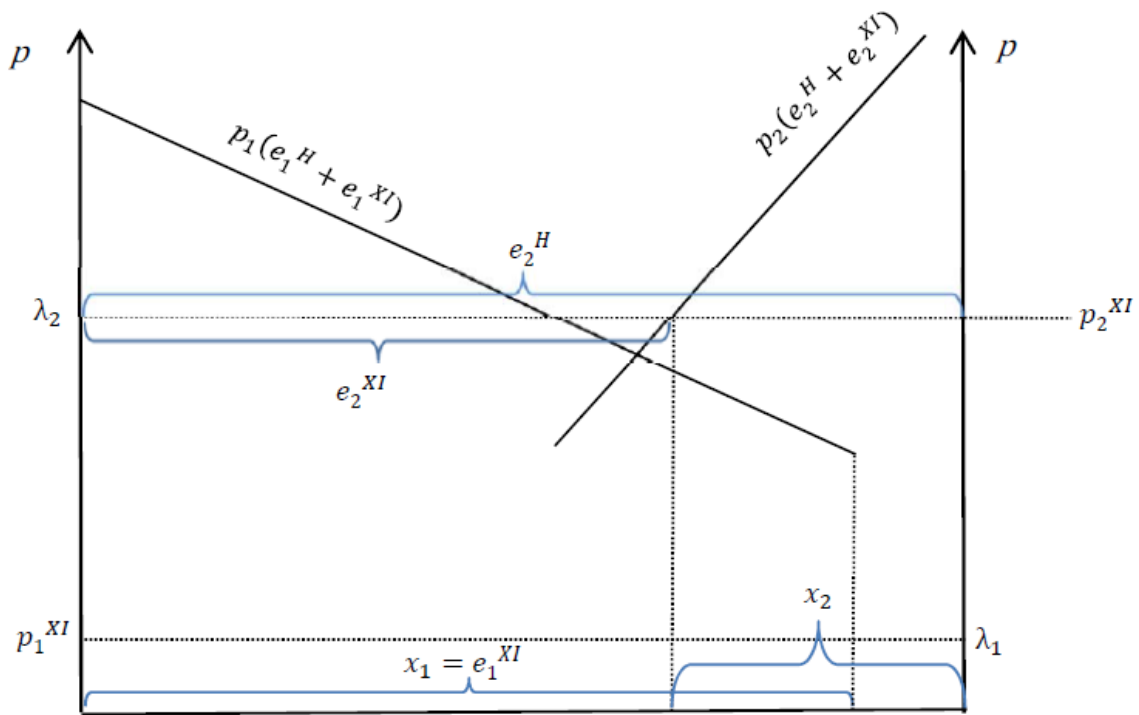
$$\lambda_t \geq 0 \quad (= 0 \text{ for } R_t < R_{t-1} + w_t - e_t^H)$$

$$\gamma_t \geq 0 \quad (= 0 \text{ for } R_t < \bar{R}) \quad (28)$$

$$\alpha_t \geq 0 \quad (= 0 \text{ for } e_t^{XI} < \bar{e}^{XI})(e_t^{XI} > 0)$$

$$\beta_t \geq 0 \quad (= 0 \text{ for } -e_t^{XI} < \bar{e}^{XI})(e_t^{XI} < 0)$$

Med antagelse om at  $\lambda_t > 0$ , og  $\gamma_t, \alpha_t, \beta_t = 0$ , illustrerer badekardiagrammet den optimale tilpasningen av vannkraftproduksjon.



**Figur 30:** Vannkraftprodusentens tilpasning ved ingen skranker og ubegrenset kraftoverføring

I figuren importeres mengden  $e_1^{XI}$  i periode 1, og som også er den omsatte mengden i innlandet  $x_1$ . I periode 2 produseres  $e_2^H$  av vannkraftprodusenten, mengden  $e_2^{XI}$  eksporteres til verdensmarkedet, og omsattmengde i innlandet av energi i periode 2 er  $x_2$ .

I kapittel 3.2.3 illustreres figuren med antagelse om  $\lambda_t, \gamma_t, \alpha_{t+1}, \beta_t > 0$ .

## 10.2 Utledning av den teoretiske modellen

Likevekten i markedet finner vi ved likning (12) og (13). Ved å derivere (12) med hensyn på  $\alpha_i$ , får vi følgende likevekt for energimarkedet

$$f'_i \left( \frac{\partial p_i}{\partial \alpha_i} + p_{sert} + \frac{\partial p_{sert}}{\partial \alpha_i} \right) - f_i - \alpha_i f'_i \left( \frac{\partial p_i}{\partial \alpha_i} + p_{sert} + \frac{\partial p_{sert}}{\partial \alpha_i} \right) = h'_i \left( \frac{\partial p_i}{\partial \alpha_i} \right) \quad (29)$$

Reformulering gir (30)

$$-f_i + (1 - \alpha_i) f'_i \left( \frac{\partial p_i}{\partial \alpha_i} + p_{sert} + \alpha_i \frac{\partial p_{sert}}{\partial \alpha_i} \right) = h'_i \left( \frac{\partial p_i}{\partial \alpha_i} \right) \quad (30)$$

Ved antagelse om økt tilbud ved økt pris (6). Videre reformulering av (30) gir

$$[(1 - \alpha_i) f'_i - h'_i] \frac{\partial p_i}{\partial \alpha_i} + (1 - \alpha_i) \alpha_i f'_i \left( \frac{\partial p_{sert}}{\partial \alpha_i} \right) = f_i - (1 - \alpha_i) f'_i p_{sert} \quad (31)$$

Ved å derivere (13) med hensyn på  $\alpha_i$ , får vi følgende likevekt for sertifikatmarkedet

$$f_i + \alpha_i f'_i \left( \frac{\partial p_i}{\partial \alpha_i} + p_{sert} + \alpha_i \frac{\partial p_{sert}}{\partial \alpha_i} \right) = g'_i \left( \frac{\partial p_i}{\partial \alpha_i} + \frac{\partial p_{sert}}{\partial \alpha_i} \right) \quad (32)$$

Ved antagelse om fallende etterspørsel som funksjon av energi- og sertifikatpris, og økende tilbud av grønn energi som funksjon av prisene

$$f'_i = \frac{\partial f_i}{\partial p_i} < 0 \quad (33)$$

$$f'_i = \frac{\partial f_i}{\partial p_{sert}} < 0 \quad (34)$$

$$g'_i = \frac{\partial g_i}{\partial p_{sert}} > 0 \quad (35)$$

$$g'_i = \frac{\partial g_i}{\partial p_i} > 0 \quad (36)$$

vil en reformulering av (32) gi

$$(\alpha_i f'_i - g'_i) \frac{\partial p_i}{\partial \alpha_i} + (\alpha_i^2 f'_i - g'_i) \frac{\partial p_{sert}}{\partial \alpha_i} = -f_i - \alpha_i f'_i p_{sert} \quad (37)$$

For å kunne løse systemet av lineære likninger med flere ukjente, brukes Cramer's rule (Sydsæter & Hammond 2008, s.600-603). Dette løses for  $\frac{\partial p_i}{\partial \alpha_i}$ ,  $\frac{\partial p_{sert}}{\partial \alpha_i}$  og  $\frac{\partial p_{i,k}}{\partial \alpha_i}$

Ved å introdusere følgende sammenheng

$$\begin{aligned}
a_{11} &= (\alpha_i f'_i - g'_i) \\
a_{12} &= (\alpha_i^2 f'_i - g'_i) \\
a_{21} &= [(1 - \alpha_i) f'_i - h'_i] \\
a_{22} &= (1 - \alpha_i) \alpha_i f'_i \\
b_1 &= -f_i - \alpha_i f'_i p_{sert} \\
b_2 &= f_i - (1 - \alpha_i) f'_i p_{sert}
\end{aligned} \tag{38}$$

Blir (31) og (37)

$$b_2 = a_{21} \frac{\partial p_i}{\partial \alpha_i} + a_{22} \frac{\partial p_{sert}}{\partial \alpha_i} \tag{39}$$

$$b_1 = a_{11} \frac{\partial p_i}{\partial \alpha_i} + a_{12} \frac{\partial p_{sert}}{\partial \alpha_i} \tag{40}$$

Determinanten er dermed gitt ved:

$$\begin{aligned}
|A| &= \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} = a_{11} a_{22} - a_{21} a_{12} \\
&= (\alpha_i f'_i - g'_i)(1 - \alpha_i) \alpha_i f'_i - [(1 - \alpha_i) f'_i - h'_i](1 - \alpha_i) \alpha_i f'_i \\
&= \alpha_i^2 f_i'^2 (1 - \alpha_i) - f'_i g'_i \alpha_i (1 - \alpha_i) - \alpha_i^2 f_i'^2 (1 - \alpha_i) + f'_i g'_i \alpha_i (1 - \alpha_i) \\
&\quad + f'_i h'_i \alpha_i^2 - h'_i g'_i \\
&= (1 - \alpha_i)^2 f'_i g'_i + \alpha_i^2 f'_i h'_i - h'_i g'_i \\
|A| &< 0
\end{aligned} \tag{41}$$

Determinanten er negativ med antagelsen om at  $f'_i$  er negativ, og at  $h'_i$  og  $g'_i$  er positiv.

$$\begin{aligned}
|A_1| &= \begin{bmatrix} b_1 & a_{12} \\ b_2 & a_{22} \end{bmatrix} = b_1 a_{22} - b_2 a_{12} \\
&= (-f_i - \alpha_i f'_i p_{sert})(1 - \alpha_i) \alpha_i f'_i - [f_i - (1 - \alpha_i) f'_i p_{sert}](\alpha_i^2 f'_i - g'_i) \\
&= -f_i (1 - \alpha_i) \alpha_i f'_i - \alpha_i^2 f_i'^2 (1 - \alpha_i) p_{sert} - \alpha_i^2 f_i f'_i + f_i g'_i
\end{aligned} \tag{42}$$

$$\begin{aligned}
& +(1 - \alpha_i)\alpha_i^2 f_i' p_{sert} - (1 - \alpha_i)f_i' g_i' p_{sert} \\
& = -\alpha_i f_i f_i' + f_i g_i' - (1 - \alpha_i)f_i' g_i' p_{sert}
\end{aligned}$$

$$|A_1| > 0$$

Med de samme antagelsene som tidligere, får vi at  $|A_1|$  er positiv i alle ledd.

$$\frac{-f_i'[\alpha_i f_i + (1 - \alpha_i)g_i' p_{sert}] + f_i g_i'}{(1 - \alpha_i)^2 f_i' g_i' + \alpha_i^2 f_i' h_i' - g_i' h_i'} < 0$$

$$\frac{\partial p_i}{\partial \alpha_i} = \frac{|A_1|}{|A|} < 0 \quad (43)$$

Dette vil si at brøken vår er negativ. Videre løser vi

$$\begin{aligned}
|A_2| &= \begin{vmatrix} a_{11} & b_1 \\ a_{21} & b_2 \end{vmatrix} = a_{11}b_2 - a_{21}b_1 \\
&= (\alpha_i f_i' - g_i')[f_i - (1 - \alpha_i)f_i' p_{sert}] - [(1 - \alpha_i)f_i' - h_i'](-f_i - \alpha_i f_i' p_{sert}) \\
&= [\alpha_i f_i f_i' - (1 - \alpha_i)\alpha_i f_i'^2 p_{sert}] - f_i g_i' + [(1 - \alpha_i)f_i' g_i' p_{sert}] + \\
&\quad (1 - \alpha_i)f_i f_i' + (1 - \alpha_i)f_i'^2 p_{sert} - f_i h_i' - \alpha_i f_i' h_i' p_{sert} \\
&= f_i f_i' - f_i(g_i' + h_i') + f_i' p_{sert}[(1 - \alpha_i)g_i' - \alpha_i h_i'] \\
|A_2| &< 0
\end{aligned} \quad (44)$$

Dette holder hvis andelen  $\alpha_i$  øker,  $\frac{g_i'}{h_i'} > \frac{\alpha_i}{(1 - \alpha_i)}$  eller

$|f_i f_i' - f_i(g_i' + h_i')| > f_i' p_{sert}[(1 - \alpha_i)g_i' - \alpha_i h_i']$ . Utenom dette vil den være usikker.

$$\frac{f_i f_i' - f_i(g_i' + h_i') + f_i' p_{sert}[(1 - \alpha_i)g_i' - \alpha_i h_i']}{(1 - \alpha_i)^2 f_i' g_i' + \alpha_i^2 f_i' h_i' - g_i' h_i'}$$

$$\frac{\partial p_{sert}}{\partial \alpha_i} = \frac{|A_2|}{|A|} \quad (45)$$

$\frac{\partial p_{sert}}{\partial \alpha_i}$  vil være positiv hvis antagelsen om  $|A_2|$  over holder. Endring i prisen på grønn energi

er definert som  $\frac{\partial p_{i,g}}{\partial \alpha_i} = \frac{\partial p_i}{\partial \alpha_i} + \frac{\partial p_{sert}}{\partial \alpha_i}$ .

$$\frac{\partial p_{i,g}}{\partial \alpha_i} = \frac{1}{|A|} \left[ -\alpha_i f_i f_i' + f_i g_i' - (1 - \alpha_i) f_i' g_i' p_{sert} + \right. \\ \left. f_i f_i' - f_i (g_i' + h_i') + f_i' p_{sert} [(1 - \alpha_i) g_i' - \alpha_i h_i'] \right] \\ \frac{\partial p_{i,g}}{\partial \alpha_i} = \frac{1}{|A|} [(1 - \alpha_i) f_i f_i' - f_i h_i' - \alpha_i f_i' h_i' p_{sert}] \quad (46)$$

$\frac{\partial p_{i,g}}{\partial \alpha_i}$  vil avhenge av prisendring på sertifikatet (45), og endringen i prisen for energi vil være negativ (43).

Konsumentprisen blir definert som energiprisen og en andel multiplisert med sertifikat prisen.

Ved å derivere gjennom med hensyn på  $\alpha_i$ , blir uttrykket vårt.

$$\frac{\partial p_{i,k}}{\partial \alpha_i} = \frac{\partial p_i}{\partial \alpha_i} + \alpha_i \frac{\partial p_{sert}}{\partial \alpha_i} + p_{sert} \quad (47)$$

Ved å definere disse brøkene til følgende

$$\frac{\partial p_{i,k}}{\partial \alpha_i} = \frac{|A_1|}{|A|} + \alpha_i \frac{|A_2|}{|A|} + p_{sert} \quad (48)$$

blir uttrykket omskrevet til

$$\frac{\partial p_{i,k}}{\partial \alpha_i} = \frac{1}{|A|} \left[ (1 - \alpha_i) f_i g_i' - \alpha_i f_i h_i' - (1 - \alpha_i)^2 f_i' g_i' p_{sert} - \right. \\ \left. \alpha_i^2 f_i' h_i' p_{sert} + (1 - \alpha_i)^2 f_i' g_i' p_{sert} + \alpha_i^2 f_i' h_i' p_{sert} - g_i' h_i' p_{sert} \right] \\ \frac{\partial p_{i,k}}{\partial \alpha_i} = \frac{1}{|A|} [f_i' ((1 - \alpha_i) g_i' - \alpha_i h_i') - g_i' h_i' p_{sert}] \quad (49)$$



### 10.3 Den kalibrerte modellen

I den følgende modellen er  $p_i$  elektrisitetsprisen<sup>20</sup>,  $p_{sert}$  sertifikatprisen,  $p_{i,g}$  totalprisen produsenten av grønn energi mottar, og  $p_{i,k}$  er prisen konsumentene betaler for energi. Landene i modellen er gitt ved  $i = NO, GER, UK$

Cobb-Douglas funksjonen for tilbud av tradisjonell kraft fra land  $i$ , er

$$X_{i,e} = A_{i,e}(p_i)^{\tau_{i,e}}$$

$A_{i,e}$  er kalibreringsfaktoren og  $\tau_{i,e}$  er tilbudselasticiteten for tradisjonell kraft. Den grønne produsenten får et tillegg utover energiprisen i sertifikatordningen, og er gitt ved

$$X_g = A_g(p_i + p_{sert})^{\tau_g} - B_g$$

$B_g$  er et konstantledd for tilbudet av grønn energi. Grønt blir kun produsert i Norge. Den grønne produsenten får en pris  $p_{i,g} = p_i + p_{sert}$  hvor totaletterspørsel etter kraft i land  $i$  er gitt som en funksjon av konsumentprisen

$$X_{i,D} = A_{i,D}(p_{i,k})^{\varepsilon_i}$$

hvor konsumentprisen er  $|p_{i,k} = (1 - \alpha)p_i + \alpha p_{i,g} = p_i + \alpha p_{sert}|$  og  $\varepsilon_i$  er etterspørselselasticiteten i land  $i$ . I de to landene som ikke har de grønne sertifikatene vil konsumentprisen være energiprisen. Videre skal grønn energi utgjøre en bestemt andel av totaltilbud i markedet, slik at følgende betingelse må oppfylles

$$X_g = \alpha(X_{i,e} + X_g)$$

Videre vil derfor likevekten i sertifikatmarkedet i Norge bli

$$\alpha X_{i,D} = X_g$$

$$\alpha [A_{i,D}(p_{i,k})^{\varepsilon_i}] = [A_g(p_i + p_{sert})^{\tau_g} - B_g]$$

og etterspørselen i elektrisitetsmarkedet

$$(1 - \alpha)[A_{i,D}(p_{i,k})^{\varepsilon_i}] = A_{i,e}(p_i)^{\tau_{i,e}}$$

---

<sup>20</sup> Husk fra (9), kapitel 4.2.2:

$$p_i = p_{sys} + \pi_i$$

Etterspørselen i de to andre landene vil kun være gitt ved

$$[A_{i,D}(p_i)^{\varepsilon_i}] = A_{i,e}(p_i)^{\tau_{i,e}}$$

siden de ikke har et krav om fastandel av grønn energi. Videre må markedene være i likevekt i Norge, Storbritannia og Tyskland slik at totaltilbud og -etterspørsel er

$$X^T = X_{NO,T} + X_{UK,e} + X_{GER,e}$$

$$X^D = X_{NO,D} + X_{UK,D} + X_{GER,D}$$

$$X^T = X^D$$

hvor  $X_{NO,T} = (X_{NO,e} + X_g)$ . Nettoeksport fra Norge er gitt ved

$$NX_{NO} = X_{NO,T} - X_{NO,D}$$

I Tyskland og Storbritannia er nettoeksporten,  $i = UK, GER$

$$NX_i = X_{i,e} - X_{i,D}$$

Betingelsen for maksimal kraft flyt settes på nettoeksport. Etterspørselen etter i kraft Norge ved handel er

$$X_{NO,D} = X_{NO,T} + NX_{UK} + NX_{GER}$$

og Tyskland og Storbritannia

$$X_{GER,D} = X_{GER,e} + NX_{NO} + NX_{UK}$$

$$X_{UK,D} = X_{UK,e} + NX_{NO} + NX_{GER}$$

## 10.4 GAMS modellen

OPTION DNLP = MINOS

SETS

t /0\*500/

;

PARAMETERS

ADno	Konstantledd i etterspørselsfunksjonen i NO
EpsilonDno	Etterspørselens priselastisitet i NO
AEno	Konstantledd i tilbudsfunksjon Vanlig elektrisitet i NO
TauEno	Tilbudselastisitet Vanlig elektrisitet i NO
Agno	Konstantledd i tilbudsfunksjon Grønn elektrisitet i NO
BGno	Konstantledd i tilbudsfunksjon Grønn elektrisitet i NO
TauGno	Tilbudselastisitet for Grønn elektrisitet i NO
ALFAno	Krav andel Grønn elektrisitet av total elektrisitet prod i NO
P_0no	Antatt kraftpris før innføring av grønt marked i NO
PG_0no	Kraftprisen grønn produsent vil begynne å produsere i NO
PG_13no	Kraftprisen grønn produsent vil produsere 13TWh i NO
XD_0no	Antatt etterspørsel i TWh før innføring av grønt, og handel i NO
XTE_0no	Antatt tilbud av Vanlig i TWh før innføring grønt, og handel i NO
XTG_0no	Antatt tilbud av Groen i TWh før innføring av sertifikater, og handel i NO

ADuk	Konstantledd i etterspørselsfunksjonen i UK
EpsilonDuk	Etterspørselens priselastisitet i UK
AEuk	Konstantledd i tilbudsfunksjon av Vanlig elektrisitet i UK
TauEuk	Tilbudselastisitet for Vanlig elektrisitet i UK
P_0uk	Antatt kraftpris før innføring av handel i UK
XD_0uk	Antatt etterspørsel i TWh før innføring av handel i UK
XTE_0uk	Antatt tilbud av Vanlig i TWh før handel i UK

ADge	Konstantledd i etterspørselsfunksjonen i GER
EpsilonDge	Etterspørselens priselastisitet i GER
AEge	Konstantledd i tilbudsfunksjon Vanlig elektrisitet i GER
TauEge	Tilbudselastisitet for Vanlig elektrisitet i GER
P_0ge	Antatt kraftpris før innføring av handel i GER
XD_0ge	Antatt etterspørsel i TWh før innføring av handel i GER
XTE_0ge	Antatt tilbud av Vanlig i TWh før handel i GER

Faktorno	Faktor som definerer pino for flyt NO
Faktoruk	Faktor som definerer piUK for flyt UK
Faktorge	Faktor som definerer pige for flyt GER

;

\* PARAMETRE FOR LAGRING AV RESULTAT VED VARIERENDE t

PARAMETERS

XXDno(t)	Etterspørsel etter elektrisitet i TWh per år NO
----------	---

XXT <sub>no</sub> (t)	Samlet tilbud av elektrisitet i TWh per år NO
XXTE <sub>no</sub> (t)	Samlet tilbud av Vanlig elektrisitet i TWh per år NO
XXTG <sub>no</sub> (t)	Samlet tilbud av Grønn elektrisitet i TWh per år NO
XPK <sub>no</sub> (t)	Pris til konsument i øre per KWh NO
XPE <sub>no</sub> (t)	Pris til produsent av Vanlig kraft i øre per KWh NO
XPG <sub>no</sub> (t)	Pris til produsent av Grønn kraft i øre per KWh NO
XPSERTG <sub>no</sub> (t)	Sertifikatpris for Grønn i øre per KWh NO
XXNX <sub>no</sub> (t)	Nettoflyt fra NO i TWh
Andel(t)	Andelen som defineres ved iterasjon over t
XXDuk(t)	Etterspørsel etter elektrisitet i TWh per år UK
XXTEuk(t)	Samlet tilbud av Vanlig elektrisitet i TWh per år UK
XPEuk(t)	Pris til produsent av Vanlig i øre per KWh UK
XXNXuk(t)	Nettoflyt fra UK i TWh
XXDge(t)	Etterspørsel etter elektrisitet i TWh per år GER
XXTEge(t)	Samlet tilbud av Vanlig elektrisitet i TWh per år GER
XPEge(t)	Pris til produsent av Vanlig i øre per KWh GER
XXNXge(t)	Nettoflyt fra GER i TWh
XPS(t)	Systempris
Xpino(t)	Prisfaktor på skranke i NO, ved begrenset flyt
Xpiuk(t)	Prisfaktor på skranke i UK, ved begrenset flyt
Xpige(t)	Prisfaktor på skranke i GER, ved begrenset flyt
XXTT(t)	Totaltilbud i modellen
XXDD(t)	Total etterspørsel i modellen
;	
ALF <sub>Ano</sub>	= 0.000 ;
EpsilonD <sub>no</sub>	= -0.1 ;
TauE <sub>no</sub>	= 0.3 ;
TauG <sub>no</sub>	= 0.3 ;
P_0 <sub>no</sub>	= 25 ;
PG_0 <sub>no</sub>	= 40 ;
PG_13 <sub>no</sub>	= 50 ;
XD_0 <sub>no</sub>	= 130 ;
XTE_0 <sub>no</sub>	= 130 ;
XTG_0 <sub>no</sub>	= 0 ;
EpsilonDuk	= -0.14;
TauEuk	= 0.3 ;
P_0uk	= 55 ;
XD_0uk	= 380 ;
XTE_0uk	= 380 ;
EpsilonDge	= -0.16 ;
TauEge	= 0.3 ;
P_0ge	= 30 ;
XD_0ge	= 510 ;
XTE_0ge	= 510 ;

Faktorno = 1 ;  
 Faktoruk = 1 ;  
 Faktorge = 1 ;

\*Kalibrering av konstantledd etterspørsel NO

$ADno = XD\_0no / (P\_0no ** EpsilonDno) ;$

\*Kalibrering av konstantledd Vanlig krafttilbud NO

$AEno = XTE\_0no / (P\_0no ** TauEno) ;$

\*Kalibrering av konstantledd Grønt krafttilbud NO

$AGno = 13 / ((PG\_13no ** TauGno) - (PG\_0no ** TauGno)) ;$

$BGno = AGno * (PG\_0no ** TauGno) ;$

\*Kalibrering av konstantledd etterspørsel UK

$ADuk = XD\_0uk / (P\_0uk ** EpsilonDuk) ;$

\*Kalibrering av konstantledd krafttilbud UK

$AEuk = XTE\_0uk / ((P\_0uk) ** TauEuk) ;$

\*Kalibrering av konstantledd etterspørsel GER

$ADge = XD\_0ge / (P\_0ge ** EpsilonDge) ;$

\*Kalibrering av konstantledd krafttilbud GER

$AEge = XTE\_0ge / ((P\_0ge) ** TauEge) ;$

DISPLAY ADno, AEno, AGno, BGno, ADuk, AEuk, ADge, AEge ;

## VARIABLES

XDno Etterspørsel etter elektrisitet i TWh per år NO  
 XTno Samlet tilbud av elektrisitet i TWh per år NO  
 XTEno Samlet tilbud av Vanlig elektrisitet i TWh per år NO  
 XTGno Samlet tilbud av Grønn elektrisitet i TWh per år NO  
 PKno Pris til konsument i øre per KWh NO  
 PEno Pris til produsent av Vanlig kraft i øre per KWh NO  
 PGno Pris til produsent av Grønn kraft i øre per KWh NO  
 PSERTGno Sertifikatpris for Grønn i øre per KWh NO  
 NXno Nettoflyt fra NO i TWh

XDuk Etterspørsel etter elektrisitet i TWh per år UK  
 XTuk Samlet tilbud av elektrisitet i TWh per år UK  
 XTEuk Samlet tilbud av Vanlig elektrisitet i TWh per år UK  
 PEuk Pris til produsent av Vanlig kraft i øre per KWh UK  
 NXuk Nettoflyt fra UK i TWh

XDge	Etterspørsel etter elektrisitet i TWh per år GER
XTge	Samlet tilbud av elektrisitet i TWh per år GER
XTEge	Samlet tilbud av Vanlig elektrisitet i TWh per år GER
PEge	Pris til produsent av Vanlig kraft i øre per KWh GER
NXge	Nettoflyt fra GER i TWh

PS	Systempris på energi
pino	Prisfaktor på skranke i NO, ved begrenset flyt
piuk	Prisfaktor på skranke i UK, ved begrenset flyt
pige	Prisfaktor på skranke i GER, ved begrenset flyt
XTT	Totaltilbud i modellen
XDD	Total etterspørsel i modellen
OPT	Optimand

;

#### POSITIVE VARIABLES

XDno, XTno, XTEno, XTGno, PKno, PEno, PGno, PSERTGno, XTT;

#### POSITIVE VARIABLES

XDuk, XTuk, XTEuk, PEuk, XDge, XTge, XTEge, PEge, XDD, PS;

PS.LO	= 0.01 ;
PGno.LO	= 0.01 ;
PKno.LO	= 0.01 ;
PEuk.LO	= 0.01 ;
PEge.LO	= 0.01 ;
PEno.LO	= 0.01 ;

#### EQUATIONS

XDDno	Etterspørsel etter elektrisitet i TWh per år NO
XTTno	Samlet tilbud av produsert elektrisitet i TWh per år NO
XTEEno	Samlet tilbud av Vanlig produsert elektrisitet i TWh per år NO
XTGGno	Samlet tilbud av Grønn produsert elektrisitet i TWh per år NO
XTGSERTno	Grønn kraft skal være en andel Alfa av totalt kraftproduksjon i NO
PKKno	Pris til konsument i øre per Kwh NO
PEEno	Pris til produsent i øre per KWh NO
PSERTGTno	Sertifikatpris for Grønt i øre per KWh NO
XNXno	Nettoflyt fra NO i TWh

XDDuk	Etterspørsel etter elektrisitet i TWh per år UK
XTEEuk	Tilbud av produsert elektrisitet i TWh per år UK
PEEuk	Pris til produsent av Vanlig kraft i øre per KWh UK
XNXuk	Nettoflyt fra UK i TWh

XDDge	Etterspørsel etter elektrisitet i TWh per år GER
XTEEge	Tilbud av produsert elektrisitet i TWh per år GER
PEEge	Pris til produsent av Vanlig kraft i øre per KWh GER
XNXge	Nettoflyt fra GER i TWh

BETE <sub>NO</sub>	Betingelse for etterspørsel fra NO
BETE <sub>UK</sub>	Betingelse for etterspørsel fra UK
BETE <sub>GE</sub>	Betingelse for etterspørsel fra GER
EQUKRAFT1	Totalt etterspurt i markedet
EQUKRAFT2	Totalt tilbudt i markedet
EQUKRAFT3	Tilbud lik etterspørsel
BET1	Definerer begrenset mengde med flyt for NO
BET2	Definerer begrenset mengde med flyt for UK
BET3	Definerer begrenset mengde med flyt for GER
DEF1	Definerer $p_{NO} \geq 0$ når det er skranke
DEF2	Definerer $p_{UK} \geq 0$ når det er skranke
DEF3	Definerer $p_{GE} \geq 0$ når det er skranke
OPTI	Optimand

;

\*\*\*\*Kraft i NO\*\*\*\*

\*Etterspørsel - her forutsatt brutto siden vi skal ha likevekt mot produksjon

$$XDD_{NO}.. \quad XD_{NO} = E = AD_{NO} * (PK_{NO} ** EpsilonD_{NO});$$

\*Tilbud av kraft er summen av vanlig og grønn

$$XTT_{NO}.. \quad XT_{NO} = E = XTE_{NO} + XTG_{NO} ;$$

\*Tilbud av vanligkraft som starter ved pris null

$$XTEE_{NO}.. \quad XTE_{NO} = E = AE_{NO} * ((PS + p_{NO}) ** TauE_{NO}) ;$$

\*Tilbud av grønt som starter ved minste pris definert av skjæringspunktet BG

$$XTGG_{NO}.. \quad XTG_{NO} = E = (AG_{NO} * (PG_{NO} ** TauG_{NO})) - BG_{NO} ;$$

\*Andelen grønt - andel av totalproduksjon

$$XTGSERT_{NO}.. \quad XTG_{NO} = E = ALFA_{NO} * XT_{NO} ;$$

\*Konsumentpris

$$PKK_{NO}.. \quad PK_{NO} = E = PE_{NO} + ALFA_{NO} * PSERTG_{NO} ;$$

\*Energipris i NO

$$PEE_{NO}.. \quad PE_{NO} = E = (PS + p_{NO});$$

\*Sertifikatpris Grønt

$$PSERTGT_{NO}.. \quad PSERTG_{NO} = E = PG_{NO} - PE_{NO};$$

\*\*\*\*Kraft i UK\*\*\*\*

\*Etterspørsel - her forutsatt brutto siden vi skal ha likevekt mot produksjon

$$XDD_{UK}.. \quad XD_{UK} = E = AD_{UK} * (PE_{UK} ** EpsilonD_{UK});$$

\*Tilbud av kraft i UK

$$XTEE_{UK}.. \quad XTE_{UK} = E = AE_{UK} * (PE_{UK} ** TauE_{UK}) ;$$

\*Energipris i UK – er den samme for konsument og produsent  
 $PE_{uk} = E = (PS + p_{iuk}) ;$

\*\*\*\*Kraft i GER\*\*\*\*

\*Etterspørsel - her forutsatt brutto siden vi skal ha likevekt mot produksjon  
 $XD_{ge} = E = AD_{ge} * (PE_{ge} * \epsilon_{D_{ge}}) ;$

\*Tilbud av kraft i GER

$XTE_{ge} = E = AE_{ge} * (PE_{ge} * \tau_{E_{ge}}) ;$

\*Energipris i GER - er den samme for konsument og produsent  
 $PE_{ge} = E = (PS + p_{ige}) ;$

\*\*\*\*Betingelse for flyt\*\*\*\*

\*Betingelse for etterspørsel fra NO

$BET_{no} = E = XD_{no} = E = XT_{no} + NX_{ge} + NX_{uk} ;$

\*Betingelse for etterspørsel fra UK

$BET_{uk} = E = XD_{uk} = E = XTE_{uk} + NX_{no} + NX_{ge} ;$

\*Betingelse for etterspørsel fra GER

$BET_{ge} = E = XD_{ge} = E = XTE_{ge} + NX_{no} + NX_{uk} ;$

\*Nettoeksport fra NO

$NX_{no} = E = XT_{no} - XD_{no} ;$

\*Nettoeksport fra UK

$NX_{uk} = E = XTE_{uk} - XD_{uk} ;$

\*Nettoeksport fra GER

$NX_{ge} = E = XTE_{ge} - XD_{ge} ;$

\*Totalt etterspurt i markedet

$EQUKRAFT1 = E = XD_{no} + XD_{uk} + XD_{ge} ;$

\*Totalt tilbudt i markedet

$EQUKRAFT2 = E = XT_{no} + XTE_{uk} + XTE_{ge} ;$

\*Totalt tilbudt er like totalt etterspurt

$EQUKRAFT3 = E = XTT = E = XDD ;$

\*\*\*\*Betingelse for kapasitet ved overføring\*\*\*\*

\*Maksimal mengde nettoeksport fra NO,  $\leq 24$

$BET1 = E = \text{abs}(NX_{no}) = L = 24 ;$

\*Maksimal mengde nettoeksport fra UK,  $\leq 12$

$BET2 = E = \text{abs}(NX_{uk}) = L = 12 ;$



\*Maksimal mengde nettoeksport fra GER,  $\leq 12$

BET3..  $\text{abs}(\text{NXge}) = \text{L} = 12$  ;

\*Ved høy kapasitet settes disse til store verdier, f.eks. multipliseres med 1000

\*Definerer pino = 0 når det ikke er skranke for NO, ved skranke er den  $>0$

DEF1..  $\text{Faktorno} * \text{pino} = \text{E} = 0$ ;

\*Definerer pino = 0 når det ikke er skranke for UK, ved skranke er den  $>0$

DEF2..  $\text{Faktoruk} * \text{piuk} = \text{E} = 0$ ;

\*Definerer pino = 0 når det ikke er skranke for GER, ved skranke er den  $>0$

DEF3..  $\text{Faktorge} * \text{pige} = \text{E} = 0$ ;

\*Fiktiv optimalisering siden vi har likevektsmodell

OPTL..  $\text{OPT} = \text{E} = 0$  ;

MODEL SERTI\_MARK /ALL/ ;

Loop(t,

ALFAno =  $(\text{ORD}(t)-1)/1000$  ;

SOLVE SERTI\_MARK using DNLP maximizing OPT;

\*Hvis det er nok kapasitet, skal pi=0

Faktorno =  $1\$(\text{abs}(\text{NXno.L}) < 24)$  ;

Faktoruk =  $1\$(\text{abs}(\text{NXuk.L}) < 12)$  ;

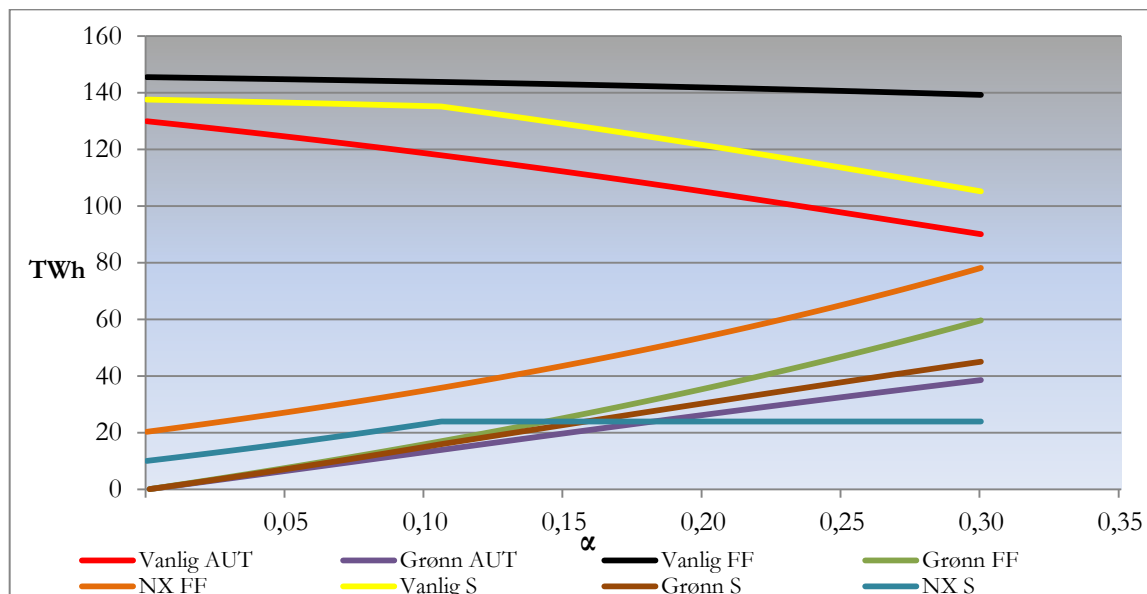
Faktorge =  $1\$(\text{abs}(\text{NXge.L}) < 12)$  ;

SOLVE SERTI\_MARK using DNLP maximizing OPT;

## 10.5 Inkluderende figurer

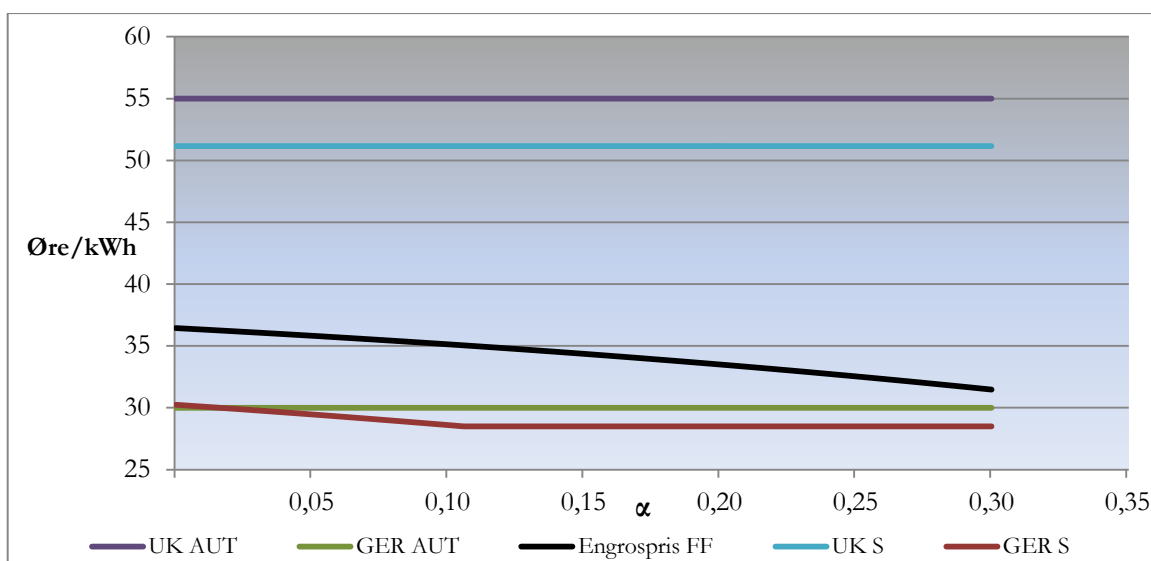
### 10.5.1 Figurer til simuleringen

Nedenfor sammenlignes volum- og priseffekter utover de som er inkludert i kapitel 6.



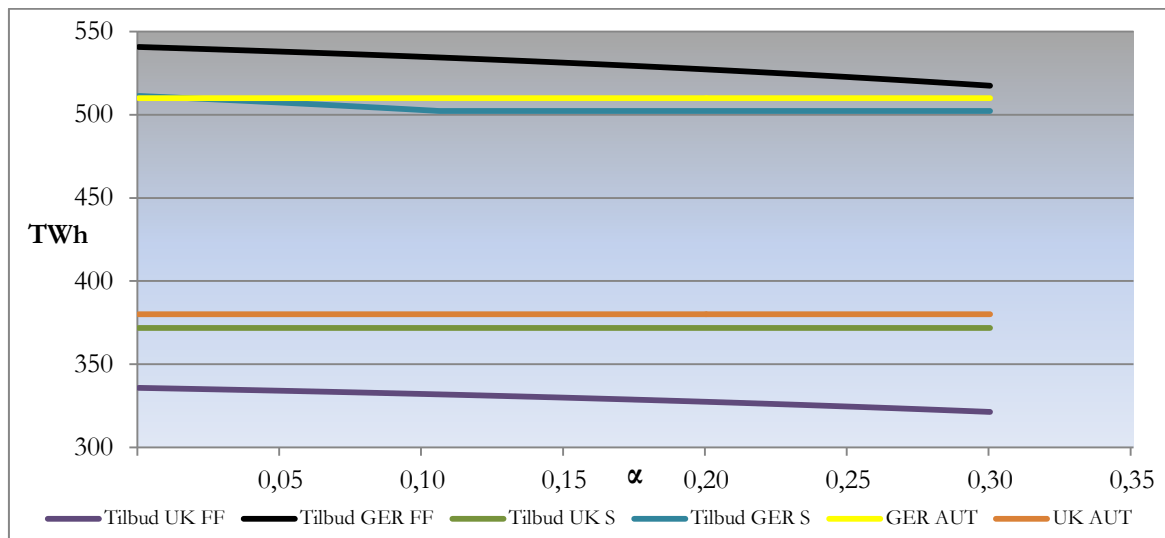
**Figur 31:** Tilbudet av energi og nettoeksport i Norge under de tre ulike scenarioene

Figur 31 sammenligner volumene i de ulike analysene. Slik det ble diskutert i kapitel 6 viser figuren at totaltilbudet fra Norge er høyere ved høy overføringskapasitet og nettoeksport øker i takt med økt omsattmengde grønn energi. Videre illustreres de ulike prisene som oppstår i Storbritannia og Tyskland i simuleringen med antagelse om ubegrenset kapasitet (FF) og begrenset kapasitet på linjen(S).



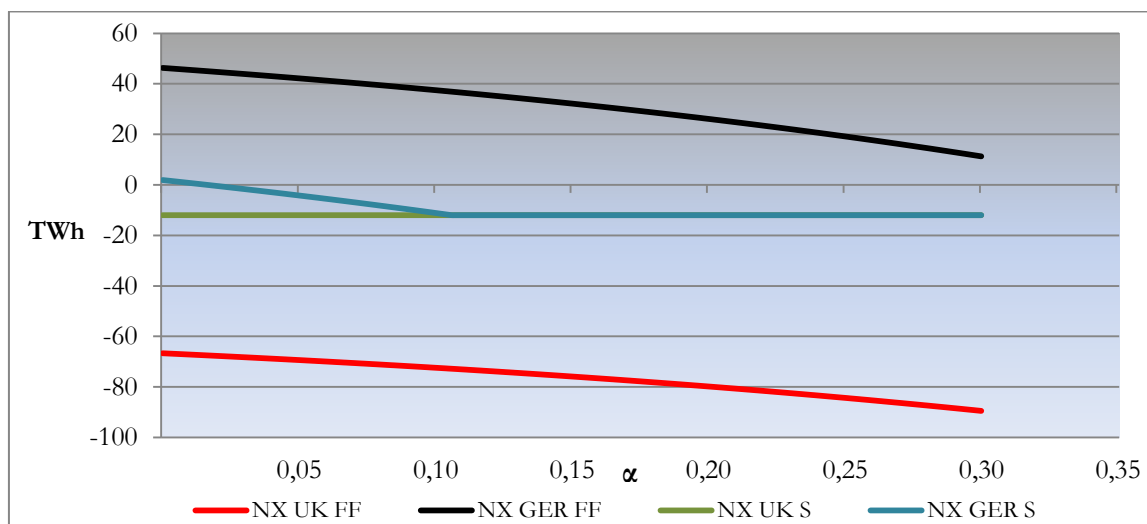
**Figur 32:** Engrospris i Tyskland og Storbritannia under de tre ulike scenarioene

Prisen er lavere i Storbritannia når kraften flyter fritt mens Tyskland får en høyere energipris sammenlignet med autarki tilpasningen.



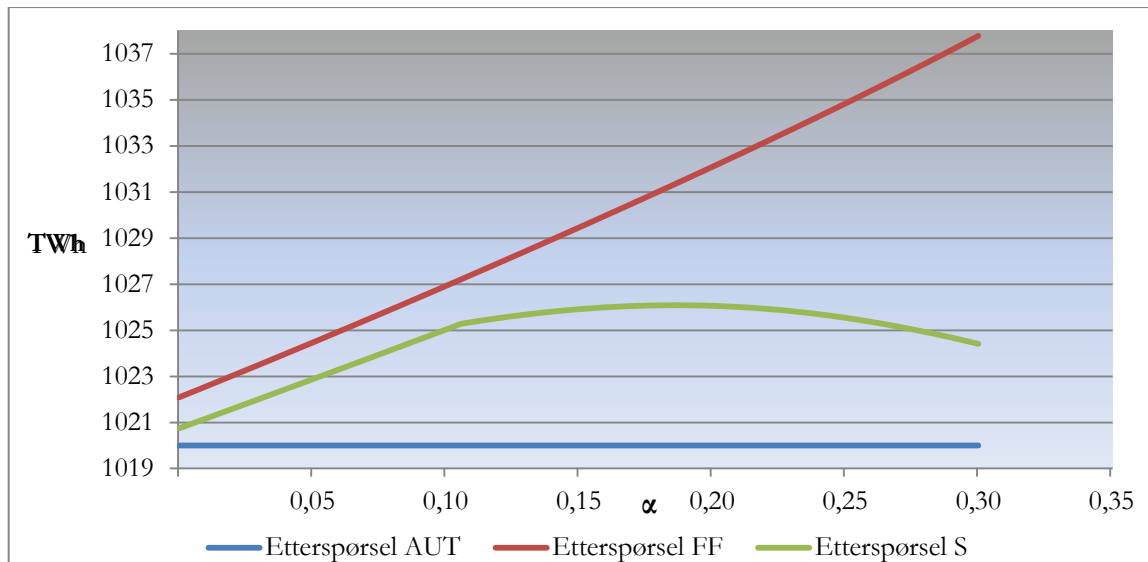
**Figur 33:** Tilbud av energi i Tyskland og Storbritannia under de tre ulike scenarioene

Tilbudet i utlandet faller i takt med økt andel grønt. Tyskland er nettoeksportør i modellen ved høy overføringskapasitet, mens Storbritannia er nettoimportør i begge simuleringene. Endringen i nettoeksport(NX) vises i figur 34.



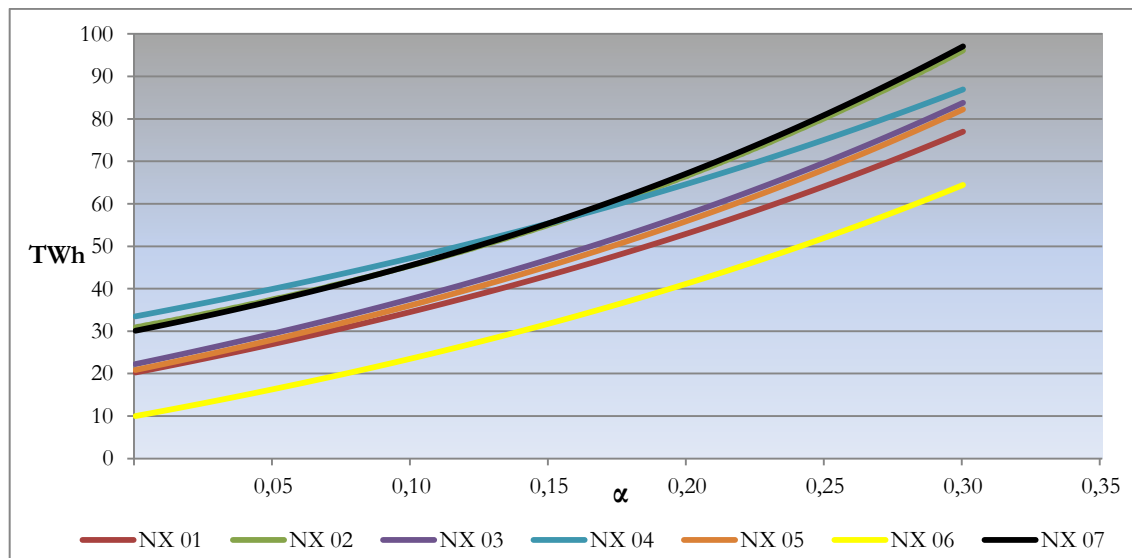
**Figur 34:** Nettoeksport fra Tyskland og Storbritannia under de tre ulike scenarioene

Figur 35 viser at den total omsatte mengden i modellen med høy overføringskapasitet er en stigende kurve i takt med økt andel grønn energi, mens med begrenset flyt er kurven konkav.



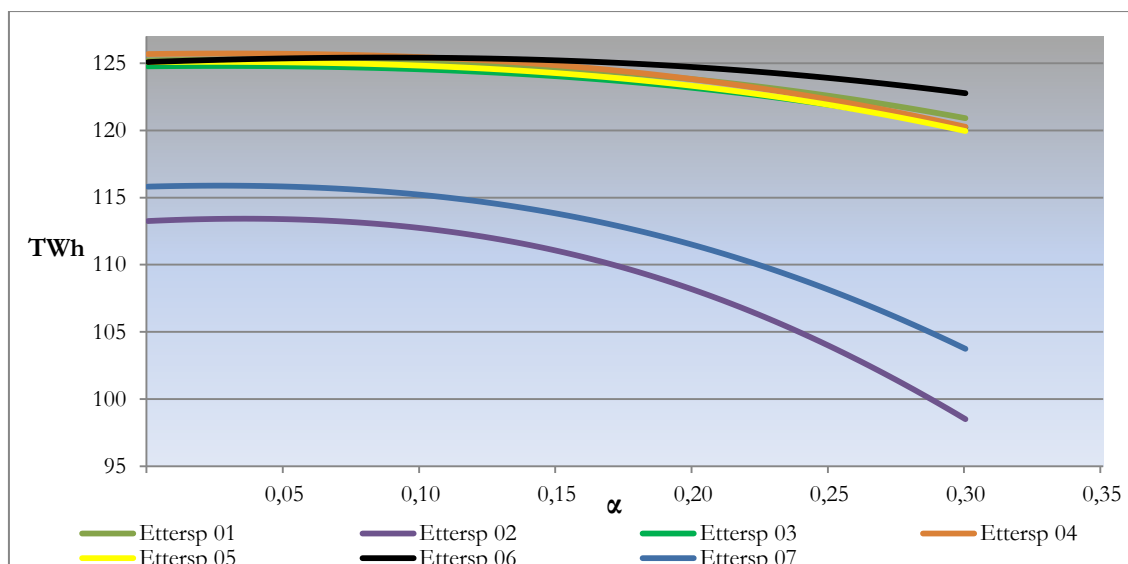
**Figur 35:** Det totale forbruket i modellen under de tre ulike scenarioene

### 10.5.2 Figurer til sensitivitetsanalysen



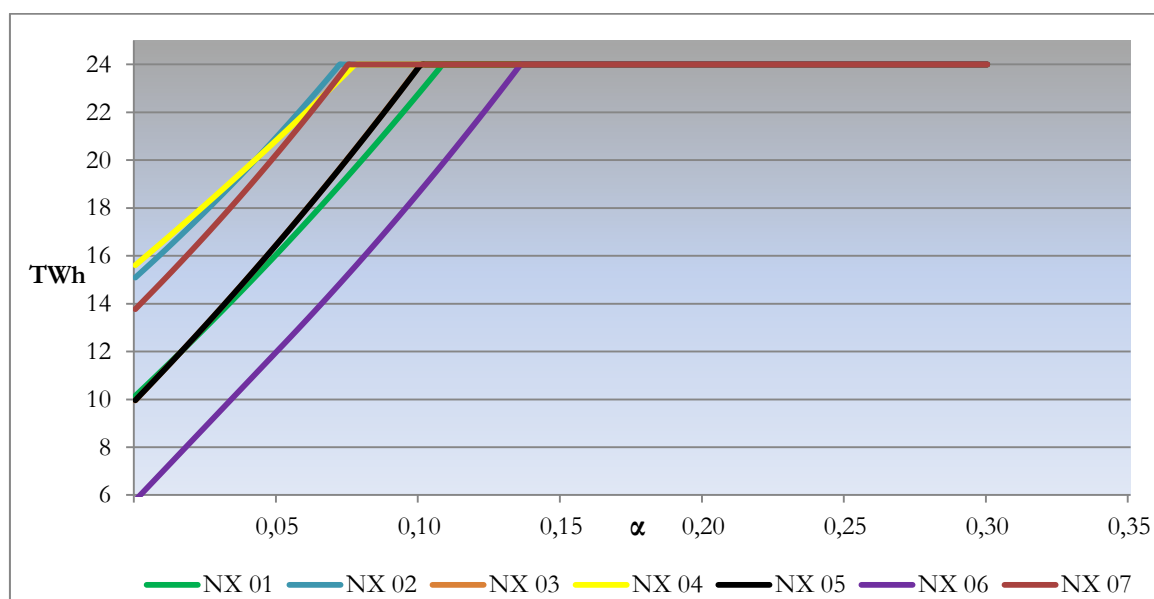
**Figur 36:** Nettoeksport fra Norge med ulike elastisitetskombinasjoner, ved ubegrenset kraftoverføring

Norge er nettoeksportør i alle elastisitetskombinasjonene, og den laveste eksportmengden er ved høytilbudselastisitet for grønn energi (NX06).



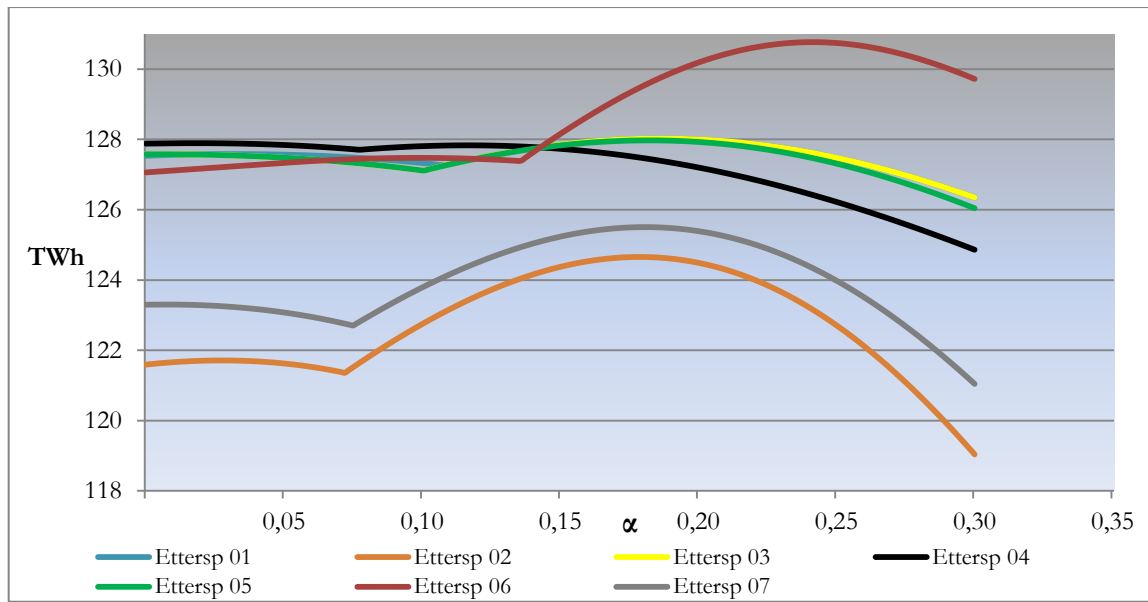
**Figur 37:** Etterspurt kraft i Norge med ulike elastisitetskombinasjoner, ved ubegrenset kraftoverføring

Etterspørselen i Norge er avtagende i alle kombinasjonene, og viser en konkav form. Kombinasjonene med høyest verdi på etterspørselselastisiteten, har lavest forbruk i Norge i figur 37.



**Figur 38:** Nettoeksport fra Norge med ulike elastisitetskombinasjoner, ved begrenset kraftoverføring

Ulike elastisiteter gir ulik veksttakt for nettoeksport og etterspørsel, og videre for når kablernes kapasitet er maksimert.



**Figur 39:** Etterspurt kraft i Norge med ulike elastisitetsskombinasjoner, ved begrenset kraftoverføring



Norges miljø- og  
biovitenskapelige  
universitet

Postboks 5003  
NO-1432 Ås  
67 23 00 00  
[www.nmbu.no](http://www.nmbu.no)